

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Simulace interakce sil mezi magnety elektrických přístrojů
Simulation of interaction forces between magnets in electrical apparatus

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Najbr

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Simulace interakce sil mezi magnety elektrických přístrojů
Simulation of interaction forces between magnets in electrical apparatus

Zásady pro vypracování:

1. Problematika stejnosměrných elektromagnetů a permanentních magnetů elektrických přístrojů.
2. Volba vhodného stejnosměrného elektromagnetu a permanentních magnetů ze vzácných zemin.
3. Simulace interakce sil mezi stejnosměrným elektromagnetem a permanentním magnetem v elektrických přístrojích.
4. Nalezení optimální vzdálenosti stejnosměrného elektromagnetu od permanentního magnetu s ohledem na síly mezi nimi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Bul B. K.: Elektrické přístroje, Praha 1977,
[2] Mayer D., Ulrych B.: Elektromagnetické aktuátory, Praha 2008, ISBN 978-80-7300-216-9

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Zajaczek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 7.5.2015



Podpis

Touto cestou bych rád chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Zajackovi, Ph.D. za ochotu, odborné znalosti související s problematikou tématu a připomínky při zpracovávání bakalářské práce, a také svojí rodině za psychickou a materiální podporu při studiu.

Abstrakt

Tato práce pojednává o simulaci interakce a výpočtu vzájemného působení sil mezi jedním permanentním magnetem v podobě rovinné plochy, a druhým elektromagnetem napájeným stejnosměrným proudem umístěným v určitých výškách právě nad permanentním magnetem.

Simulace interakce a jeho následná vizualizace byla prováděna za pomoci výpočtového programu „COMSOL Multiphysics“.

Abstract

This paper discusses the interaction simulation and calculation of the interaction forces between a first permanent magnet in the form of a planar surface, and a second DC energized electromagnet placed at certain heights just above the permanent magnet.

Simulation interaction and subsequent visualization was performed using the computer program "COMSOL Multiphysics".

Klíčová slova

Elektromagnet, stejnosměrný elektromagnet, střídavý elektromagnet, permanentní magnet, trvalý magnet, silová interakce, elektrický přístroj, vzduchová mezera, tahová charakteristika, magnetická indukce, magnetická intenzita, Lorentzova síla, silové působení, magnetické materiály, NdFeB, SmCo, BH charakteristika, hysterezní smyčka, simulace, meshování, Comsol Multiphysics, magnetická levitace.

Key Words

Electromagnet, DC electromagnet, AC electromagnet, permanent magnet, force interaction, electrical apparatus, air gap, tensile characteristics, magnetic induction, magnetic intensity, Lorentz force, magnetic materials, NdFeB, SmCo, BH characteristic, hysteresis loop, simulation, meshing, Comsol Multiphysics, magnetic levitation.

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>Symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>Popis</i>
\mathbf{A}	(-); ($\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$)	regulační matice ($\mathbf{n} \times \mathbf{n}$); vektorový magnetický potenciál $\mathbf{A}(x, y, z)$
\mathbf{B}	(T)	magnetická indukce
B_F	(T)	okrajové magnetické pole siločár, (fringing magnetic field)
B_L	(T)	pole magnetických siločár procházející prostorem, (magnetic field lines)
B_m	(T)	maximální okamžitá hodnota magnetické indukce
B_r	(T)	magnetická remanence
$(BH)_{\max}$	($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	maximální energetický součin
\mathbf{C}	(-)	označení železného jádra
\mathbf{D}	($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)	elektrická indukce
\mathbf{F}	(N)	síla
F_{av}	(N)	střední hodnota síly
F_{NdFeB}	(N)	síla působení vzhledem k permanentnímu magnetu NdFeB
F_{SmCo}	(N)	síla působení vzhledem k permanentnímu magnetu SmCo
\mathbf{G}	(-)	označení vzduchové mezery
\mathbf{H}	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	intenzita magnetického pole
H_c	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	koercitivita magnetické intenzity
H_{cB}	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	hodnota koercitivity vyskytující se ve funkci $B = f(H)$
H_{cJ}	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	hodnota koercitivity vyskytující se ve funkci $J = f(H)$
\mathbf{I}	(A)	elektrický proud
I_b	(A)	budící (řídící) proud
\mathbf{J}	($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)	proudová hustota
\mathbf{J}	(-)	označení „jižního“ magnetického pólu zdroje magnetického pole
\mathbf{L}	(-)	označení průměrné dráhy magnetického toku
S	(m^2)	plocha
\mathbf{S}	(-)	označení „severního“ magnetického pólu zdroje magnetického pole
V	(m^3)	objem
\mathbf{b}	(-)	vektor pravých stran
\mathbf{f}	($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	objemová hustota síly
\mathbf{n}	(-)	vektor normálové plochy
s	(-)	poloha kotvy elektromagnetu
s_k	(-)	konečná poloha kotvy elektromagnetu
s_p	(-)	počáteční poloha kotvy elektromagnetu
t	(s)	čas
t'_{poh}	(s)	doba spínání elektromagnetu
t''_{poh}	(s)	vypínací doba elektromagnetu
\mathbf{x}	(-)	vektor neznámých
x, y, z	(-)	souřadnice prostorové polohy užívané v programu Comsol
Φ	(Wb)	magnetický tok
Φ_b	(Wb)	budící (řídící) magnetický tok
Φ_p	(Wb)	polarizační magnetický tok
δ	(mm)	velikost vzduchové mezery
ε	($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	permitivita
ε_r	(-)	relativní permitivita
σ	($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	elektrická vodivost
μ	($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	permeabilita

μ_0	(H·m ⁻¹)	permeabilita vakua
μ_r	(-)	relativní permeabilita
$\mu_{r \text{ NdFeB}}$	(-)	hodnota relativní permeability materiálu NdFeB
$\mu_{r \text{ SmCo}}$	(-)	hodnota relativní permeability materiálu SmCo
ω	(rad·s ⁻¹)	úhlová frekvence

Zkratka	Význam
AC	střídavý proud (alternating current)
Al	hliník
AlNiCo	permanentní magnet o složení: hliník - nikl – kobalt
BH, $B(H)$	$B = f(H)$, magnetická indukce je funkcí magnetické intenzity
Co	kobalt
Comsol	COMSOL Multiphysics, simulační a výpočtový softwarový program
DC	stejnoseměrný proud (direct current)
Dy	dysprosium
Fe	železo
$H(B)$	$H = f(B)$, magnetická intenzita je funkcí magnetické indukce
$J(H)$	$J = f(H)$, magnetická polarizace je funkcí magnetické intenzity; magnetická polarizace J udává rozdíl mezi magnetickou indukcí ve feromagnetické látce a ve vakuu: $J = B - B_0$ (T) [8]
Hexaferity	hexagonální ferity
JR	Japan Railway
Maglev	magnetická levitace (magnetic levitation); vlakový superexpres
NdFeB	permanentní magnet o složení: neodým - železo - bor
Ni	nikl
SmCo	permanentní magnet o složení: samarium – kobalt
SOR	výpočtová metoda stacionárního řešiče (successive over-relaxation)
TM	přechodový kov (transition metal)
Zr	zirkonium

Obsah

1. ÚVOD	8
2. ELEKTROMAGNETY A PERMANENTNÍ MAGNETY	8
2.1. STEJNOSMĚRNÉ (DC) ELEKTROMAGNETY	9
2.2. POLARIZOVANÉ ELEKTROMAGNETY	9
2.3. STŘÍDAVÉ (AC) ELEKTROMAGNETY	10
2.4. POROVNÁNÍ CHARAKTERŮ STEJNOSMĚRNÝCH A STŘÍDAVÝCH ELEKTROMAGNETŮ	10
2.5. PERMANENTNÍ MAGNETY	11
2.6. MAGNETICKÉ MATERIÁLY	12
2.6.1. <i>Magneticky měkké materiály</i>	12
2.6.2. <i>Magneticky tvrdé materiály</i>	12
2.7. HYSTEREZNÍ SMYČKA	15
3. SOFTWAREVÁ PŘÍPRAVA SIMULACE	16
3.1. NÁVRH A TVORBA GEOMETRIE MODELU	16
3.2. PŘÍRAZENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ	17
3.3. MESHOVÁNÍ	21
4. VÝPOČET SIMULACE A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	22
4.1. MAGNETICKÁ INDUKCE	22
4.2. MAGNETICKÁ INTENZITA	25
4.3. LORENTZOVA SÍLA	27
4.4. SILOVÉ PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETU	28
5. ZÁVĚR	31
LITERATURA	32
SEZNAM PŘÍLOH	33

1. Úvod

V této práci je pojednáváno o působení silové interakce mezi elektromagnetem a permanentním magnetem v určitých výškách ve smyslu nalezení neoptimálnější vzdálenosti pro určení funkce magnetické levitace.

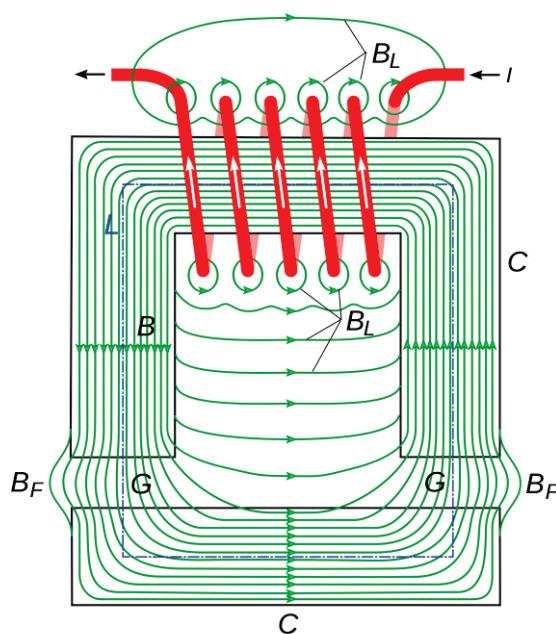
Realizace a využívání magnetické levitace v praxi je přibližně po více jak 100 letech neustále ve stádiu vývoje a její využití zasahuje do různých oblastí techniky, jakožto použití pro součásti různých speciálních zařízení využívající bezkontaktní vysokorychlostní ložiska, u zařízení pulzních elektromechanických měničů pro rychlovypínače, elektromagnetická děla aj. [5]

Na obdobných principech pracují i nejmodernější vlaky magnetických superexpresů typů *Transrapid* původem z Německa nebo *JR Maglev* v Japonsku, které jsou jedny z nejperspektivnějších dopravních prostředků dnešní doby konkurující určitým odvětvím letecké dopravy. Na základě dlouhodobějšího zájmu o elementární pochopení a fungování principů, na kterých tyto dopravní prostředky pracují, jsem se rozhodl vytvořit na toto téma danou bakalářskou práci.

Práce je rozčleněna do 3 hlavních kapitol. První z nich se věnuje obecně k popisu a definici elektrického přístroje – elektromagnetů a druhá magnetických materiálů. Druhá kapitola se zabývá seznámením se se softwarovým vybavením programu Comsol, postupným pracovním postupem nastavení a tvorbou modelu v simulačním prostředí. Třetí kapitola zahrnuje rozbor výstupních výsledků ve formě vyexportovaných obrázků.

2. Elektromagnety a permanentní magnety

Elektromagnetem nazýváme zařízení, jež vytváří v určitém prostoru magnetický tok budící cívkou, kterou prochází elektrický proud. Principiálně můžeme tyto elektromagnety rozdělit dle typu procházejícího proudu – na elektromagnety stejnosměrné a střídavé.

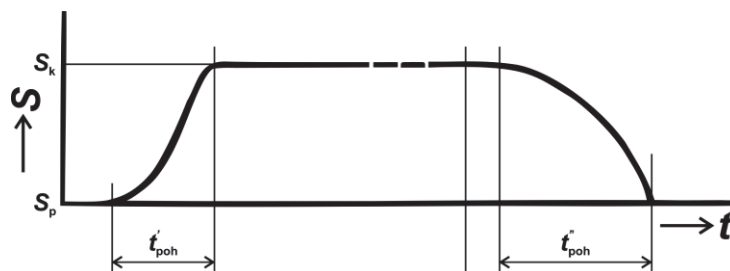


Obr. 1.: Schéma magnetického pole elektromagnetu [17]

2.1. Stejnosměrné (DC) elektromagnety

Ve stejnosměrných (nepolarizovaných) elektromagnetech se magnetický tok vytváří budicí cívkou, kterou prochází stejnosměrný proud. Činnost těchto elektromagnetů není ovlivněna na rozdíl od polarizovaných magnetů směrem budicího proudu. Nepolarizované elektromagnety se rozšířily v technické praxi nejvíce vzhledem k tomu, že jejich využití je hospodárnější, lze je zhotovit v nejrůznějších konstrukčních variantách, které se mohou snadno přizpůsobit různým provozním požadavkům. Velmi často tvoří součást elektromagnetických mechanismů zajišťujících pohyb určité části přístroje, jako např. brzdové elektromagnety, elektromagnetické spojky, elektromagnety pohyblivých částí stykačů, spouštěčů, vypínačů, jističů, relé, regulátorů aj. [1]

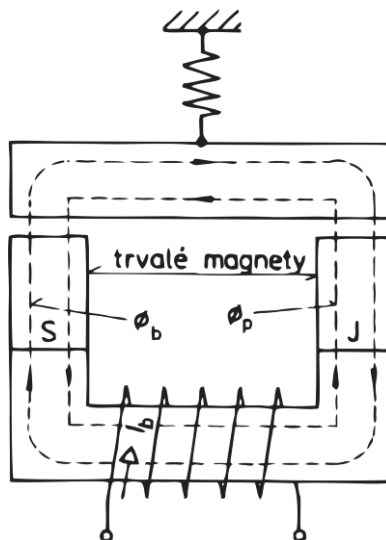
Tažná síla stejnosměrného elektromagnetu je nepřímě úměrná kvadrátu vzdálenosti. [7]



Obr. 2.: Tahová charakteristika DC elektromagnetu [1]

2.2. Polarizované elektromagnety

V magnetickém obvodu těchto magnetů se uplatňují dva magnetické toky – řídicí a polarizační. Polarizační tok se může vytvořit druhým budicím vinutím, avšak většinou se k jeho vytvoření používají trvalé magnety. Působení polarizovaných elektromagnetů závisí na polaritě budicího proudu. I když budicí cívkou neprochází řídicí proud, vzniká účinkem polarizačního toku stále určitý tah. Kotva se začne pohybovat od okamžiku vzniku proudu v řídicím vinutí. [3]



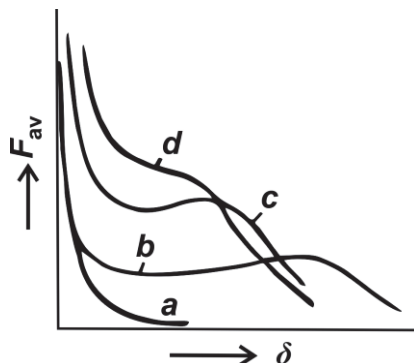
Obr. 3.: Polarizovaný elektromagnet se sériovým obvodem [3]

Tyto typy magnetů se používají např. u rychle působících relé, v převodnících elektrického signálu na změnu polohy, rychlovypínačích aj., jelikož polarizační tok ovlivňuje rychlost působení přístroje právě tím, že se pole během pracovního cyklu nezvětšuje z nuly do maxima a pak opět nezaniká. Doba zapnutí je u polarizovaných elektromagnetů podstatně kratší než u nepolarizovaných (1 – 3 ms). [1]

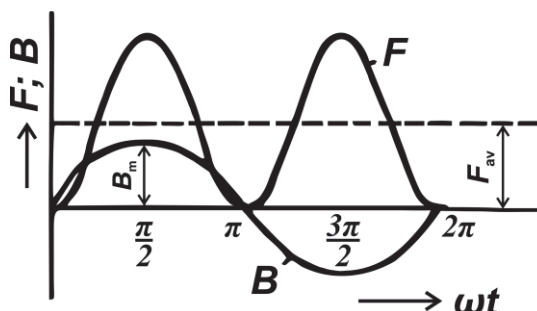
2.3. Střídavé (AC) elektromagnety

Elektromagnet, jehož budicí vinutí je napájeno ze zdroje střídavého napětí, nachází velmi široké uplatnění. Magnetický tok se mění nejen co do velikosti, ale i směru, takže elektromagnetická síla pulsuje mezi krajními hodnotami – nulou a maximem – s dvojnásobným kmitočtem v porovnání s kmitočtem napájecího zdroje (pulzace je užívána např. při konstrukci různých vibrátorů, elektromagnetických kladiv apod.).

U přidržovacích elektromagnetů je však zmenšení přitažlivé síly pod určitou úroveň nepřípustné, neboť způsobuje chvění kotvy a v některých případech i znemožňuje správnou činnost elektromagnetu. Proto musíme v těchto případech použít zvláštních opatření, jimiž omezuje pulzací magnetického toku - konstrukce těchto elektromagnetů se pak značně liší od konstrukcí stejnosměrných elektromagnetů. [1]



Obr. 4.: Různé tahové charakteristiky AC elektromagnetu
a – s vnější přitažnou kotvou
b, c, d – s vnější vtahující se kotvou [1]



Obr. 5.: Časové průběhy přitažlivé síly a magnetické indukce [1]

2.4. Porovnání charakterů stejnosměrných a střídavých elektromagnetů

Přitažlivá síla:

Střední hodnota přitažlivé síly (při dané dosedací ploše pólů) je u střídavého elektromagnetu poloviční oproti střední hodnotě stejnosměrného elektromagnetu – využití železného jádra při střídavém buzení je v nejlepším případě poloviční, než když použijeme stejnosměrný budicí proud. Tato skutečnost platí pro jednofázové i několikafázové provedení elektromagnetu.

Základní zjednodušený vzorec pro výpočet přitažlivé síly je pro oba elektromagnety následující:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (\text{N}; \text{T}, \text{m}^2, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{Wb}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2) \quad (1)$$

Kde B je magnetická indukce, S plocha, μ_0 permeabilita vakua a Φ magnetický tok. [1]

Tíha:

Při dané přitažlivé síle a zdvihu kotvy vychází střídavý elektromagnet hmotnostně těžší, a to jednak vlivem využití feromagnetika (které je poloviční) a jednak vzhledem k potřebnému zdánlivému příkonu elektromagnetu vychází větší i objem vinutí.

Nezbytný minimální jalový příkon:

Jalový příkon odebíraný střídavým elektromagnetem v okamžiku připojení na síť je jednoznačně určen požadovanou mechanickou prací kotvy a nelze ho zmenšit zvětšením rozměrů přístroje.

U stejnosměrných elektromagnetů toto neplatí – příkon můžeme zmenšit zvětšením rozměrů elektromagnetu (neuvažuje-li se rychlost působení).

Vliv vířivých proudů:

Ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní způsobují oteplení střídavého elektromagnetu. Při stejnosměrném napájení tato složka ztrát odpadá.

Ztráty způsobené vířivými proudy lze u střídavých elektromagnetů zmenšit vhodnou konstrukcí magnetického obvodu, například užitím lištěného materiálu, kterým se však určí tvar magnetického obvodu, který je hranatý a způsobí horší objemové využití – to vede ke zvýšení střední délky závitu, jež způsobuje některé konstrukční a technologické problémy.

U stejnosměrných elektromagnetů se tento materiál používá pro přístroje, které jsou určeny pro co nejrychlejší působení.

Oblasti použití:

V běžných průmyslových zařízeních napájených ze sítě 50 Hz dostatečného výkonu nejsou mnohé z uvedených nevýhod střídavých elektromagnetů podstatné a nebrání jejich použití. Velký jalový příkon na počátku zdvihu kotvy se neprojevuje u jiných spotřebičů. Jestliže je vzduchová mezera na konci zdvihu nepatrná, je příkon elektromagnetu ze sítě v sepnutém stavu poměrně malý. [1]

Z hlediska proudových poměrů a jejich vlivu na silové poměry, rozměry a využití magnetických obvodů jsou výhodnější elektromagnety stejnosměrné než střídavé. [3]

2.5. Permanentní magnety

Trvalý magnet, který si po předchozím namagnetování zachová svůj magnetismus buď úplně, nebo aspoň zčásti. [8]

Tento typ magnetů se používá k vytváření stálého magnetického pole v zařízeních měnících elektrickou energii na mechanickou (polarizační a elektromagnetické soustavy přístrojů, registrační přístroje, magnetrony, zaostřovací obvody, obvody ke zhášení oblouku aj.).

Ve většině případů jsou permanentní magnety užívány k silovému působení na feromagnetické materiály menších velikostí (magnetické upínání, synchronní přenos momentů, magnetické zámky, separátory, zdvihač, atd.) nebo v konstrukcích brzdových magnetů (různé indukční soustavy elektrických přístrojů). [1]

Pro každé individuální použití permanentního magnetu jsou vyžadovány příslušné charakteristické vlastnosti, jako třeba magnetické vlastnosti (velká koercitivní síla, remanence), teplotní závislost (hodnota Curieova bodu), mechanická pevnost, chemická odolnost, anebo obecně malá hmotnost a nízká cena.

Koercitivní síla:

Nebo jinak zvaná koercivita, je schopnost permanentního magnetu odolávat demagnetizaci externím magnetickým polem a také svým vlastním demagnetizačním polem.

Existují dva typy koercivity:

1. „skutečná“ koercivita, jednoduše zvaná „koercivita“ – magnetické pole, při kterém je celková indukce B v magnetu rovna nule.
2. „vnitřní“ koercivita – pole, při kterém je celková polarizace rovna nule (vektory polarizace individuálních magnetických domén se vzájemně ruší).

Dnešní magnety mají koercivitu několikrát lepší a tím jsou i stabilnější nežli magnety vyráběné před několika desetiletími. Jejich koercivity H_c se nacházejí nad $1 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Vysoce koercitivní magnety jako SmCo a NdFeB mají hodnoty H_c až přes $2000 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.

Remanence:

Zbytková magnetizace poté, co bylo magnetizující pole odstraněno. Koresponduje s poměrem doménových momentů, které zůstaly orientované v jednom směru.

Curieova teplota:

Přechodová teplota, nad kterou feromagnetické nebo ferimagnetické materiály ztrácí spontánní magnetizaci a stávají se paramagnetickými. [8]

Chemická odolnost:

Trvalé magnety náleží k materiálové skupině oxidových keramik (ferity), kovů (sintrované magnety ze vzácných zemin) nebo k plastem pojené keramice či plastem pojenému kovu. Tomu odpovídají i jejich chemické a fyzikální vlastnosti. Podle způsobu použití může být požadována povrchová ochrana např. formou povlakování. [1]

2.6. Magnetické materiály

Nejrůznější konstrukce a zařízení s permanentními magnety vyžadují velké množství rozdílných tvarů magnetů zhotovených z materiálů, jejichž vlastnosti se vzájemně liší. [1]

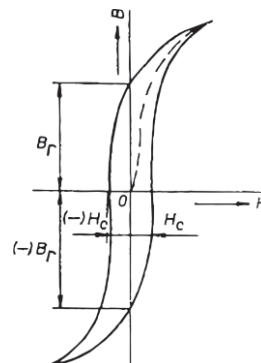
Obecně můžeme magnetické materiály rozdělit do 3 skupin:

1. Magneticky měkké materiály
2. Magneticky tvrdé materiály
3. Magnetické materiály pro speciální účely

2.6.1. Magneticky měkké materiály

V této skupině se nachází magnetické materiály, které se vyznačují úzkým tvarem hysterezní smyčky a svým snadným zmagnetováním a odmagnetováním.

Využívají se zejména ve střídavých magnetických polích pro malé ztráty vířivými proudy. Jejich výroba je technicky náročná. [4]



Obr. 6. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky měkké materiály [4]

Fe „Armco“:

Vysoce čisté železo určené pro stejnosměrná pole (materiál vykazuje malý odpor).

Křemíková ocel:

Patří k nejrozšířenějším magnetickým materiálům používaných v elektrotechnice. Křemík zvyšuje permeabilitu, hodnotu elektrického odporu materiálu, a tím snižuje hysterezní ztráty vířivými proudy, dále křemík snižuje koercitivitu a magnetickou indukci železa. Používá se pro jádra sdělovacích transformátorů, jádra nízkofrekvenčních tlumivek a točivé stroje.

Slitina Ni-Fe „PERMALLOY“:

Má velmi dobré magnetické vlastnosti, především vedle čistého Fe jde o magneticky nejměkčí materiál. Vykazuje velkou permeabilitu, dvojnásobnou rezistivitu než u čistého Fe, nízkou koercitivitu a hysterezní ztráty. Využívá se ve sdělovací technice, jádrech transformátorů, tlumivkách, stínících krytech k magnetickému odstínění.

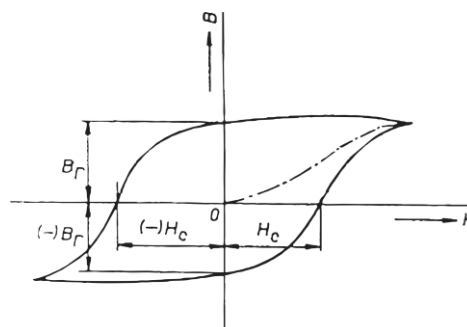
Magnetická kovová skla:

Jde o novou perspektivní skupinu materiálů. Nemají krystalickou strukturu jako běžné kovy, avšak mají stejný vzhled. Oproti elektrotechnické oceli vykazují pětikrát větší rezistivitu. Mohou být využita např. ke konstrukci jader transformátorů, k výrobě vysoce kvalitních a levných magnetických snímacích hlav pro magnetofony, miniaturní mikrofony, magnetické zesilovače nebo třeba pro magnetické stínění. [4]

2.6.2. Magneticky tvrdé materiály

V této skupině se nachází magnetické materiály, které se naopak vyznačují širokým tvarem hysterezní smyčky a tedy obtížným zmagnetováním a odmagnetováním.

Využívají se k vytváření stejnosměrných magnetických polí – výroba permanentních magnetů. [4]



Obr. 7. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky tvrdé materiály [4]

Mezi nejvíce užívané materiálové typy patří:

Ferity:

Sintrované permanentní magnety vyráběné z oxidu železa a nejčastěji z karbonátu baria nebo stroncia ($BaFeO$, $SrFeO$), svým charakterem jsou blízké keramice.

Jsou typickým představitelem ferimagnetických materiálů¹ a nejlevnějším běžným permanentním magnetem. [8]

Obecně se vyznačují velkou hodnotou rezistivity, nízkými ztrátami elektromagnetické energie a vířivými proudy a svou dokonalou homogenností.



Obr. 8. Různé výrobní formy tvrdých feritů [9]

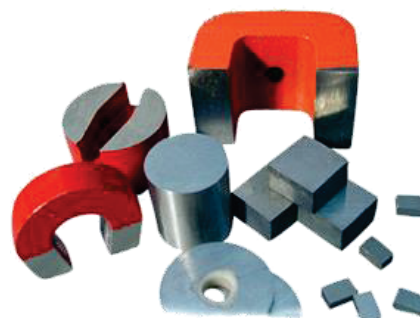
Jedním z typů magnetických oxidických materiálů (feritů) jsou magneticky tvrdé (hexagonální) ferity, které se užívají pro trvalé magnety, rotory a statory stejnosměrných a asynchronních motorků nebo obyčejné kancelářské magnety. Mají nízkou hodnotu magnetické remanence B_r . [4]

Vyrábí se v různých formách, jako disky, bloky a toroidy o malé výšce a velké ploše, jsou tvrdé, křehké a choulostivé na rozbití, odolné vůči vlivům počasí a neoxidují. [9]

AlNiCo:

Slitina složená z Fe , Al , Ni a Co . Může obsahovat další příměsi, vyrábí se sintrováním nebo litím. Vyznačují se vysokou hodnotou Curieho teploty (až 550°C), magnetické remanence B_r a nízkou hodnotou koercitivity. [4], [8], [9]

Vyrábí se ve formách disků, bloků, tyčí, toroidů a podkov. Oproti feritům nejsou v takové míře náchylné na rozbití. Rozměrově jsou vyráběny a situovány oproti feritům na větší výšky o menší ploše. [9]



Obr. 9. Různé výrobní formy AlNiCo [14]

SmCo:

Magnetický materiál vyráběný práškovou technologií. Existují dva komerční materiály, v poměru elementů 1:5 ($SmCo_5$) a 2:17 (Sm_2Co_{17}). Tyto materiály jsou charakterizovány nejvyššími hodnotami vnitřních koercivit, svou křehkostí a tvrdostí, malými rozměry a jsou druhými nejsilnějšími permanentními magnety po neodymech ($NdFeB$). [8]

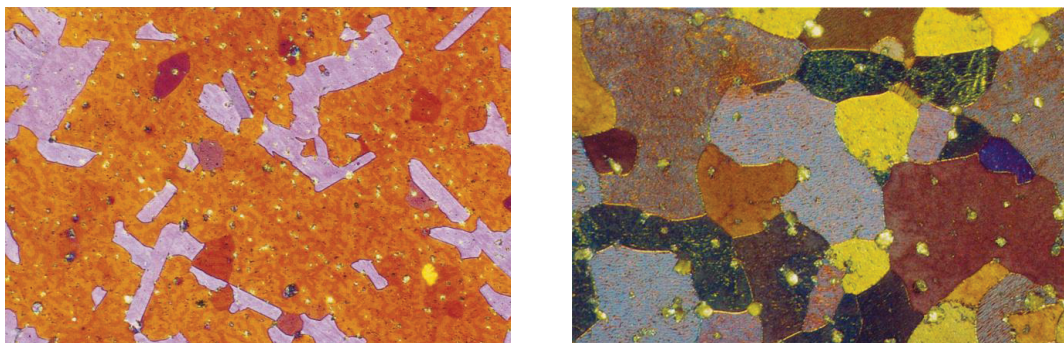
Vyrábí se ve formách bloků, disků, toroidů a různých jiných. Mají přirozenou odolnost vůči korozi, tedy bez nutnosti povrchové úpravy oproti neodymům.



Obr. 10. Různé výrobní formy SmCo [15]

Jejich nevýhodou je vysoká cena způsobená velkým zastoupením kobaltu a nejsou odolné vůči anorganickým kyselinám a rozpouštědlům. [9], [10]

¹ Materiály se spontánní magnetizací, kde alespoň dva druhy magnetických atomů v krystalové mřížce mají nestejně veliké magnetické momenty směřující proti sobě – nevyvážené antiparalelní uspořádání.



Obr. 11. Struktura SmCo magnetu zvětšená 1000x
vlevo: SmCo_5 , vpravo: $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ [8]

Struktura SmCo_5 je převážně tvořená magneticky tvrdou fází SmCo_5 (hnědá barva) a místy Sm_2Co_7 (fialová barva).

Ve struktuře $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ jsou obsaženy kromě tohoto poměru (různé barvy vznikající při leptání) jemné zrnité mezní fáze jiného složení (světlá barva) a karbidy Zr (největší částice).

Permanentní magnety na bázi SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, byly začátkem 80. let zásadně doplněny vývojem magnetů na bázi NdFeB , které jsou svým složením a cenou dostupnějšími a výhodnějšími, avšak oproti SmCo mají nižší hodnotu Curieho teploty a tím vyšší teplotní koeficienty H_{cJ} a B_r . [8]

NdFeB:

Magnetický materiál s nejvyšším energetickým součinem ($B \cdot H$). Základní složení elementů je v poměru 2:14:1. Další elementy se mohou přidávat pro vylepšení vlastností, hlavně dysprosium (Dy) pro větší koercivitu a kobalt (Co) pro zvýšení Curieova bodu. [8]

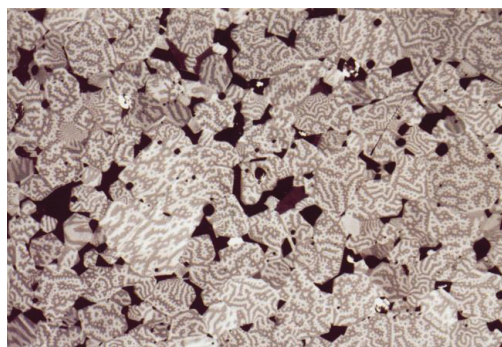
V současnosti jsou neodymy nejsilnějšími permanentními magnety.

Vyrábí se ve formách bloků, disků, toroidů, segmentů a různých jiných. Jejich nevýhodou je velká náchylnost ke korozi, při výrobě se tedy galvanizují nejčastěji zinkem, niklem, dále například pozlacením, epoxidací anebo nejnověji hliníkem a nitridem titanu. [9], [10]



Obr. 12. Diskový NdFeB [16]

Struktura NdFeB je tvořena převážně doménovou strukturou magneticky tvrdé fáze $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a zrnitými fázemi z prakticky čistého neodymu (černá barva).



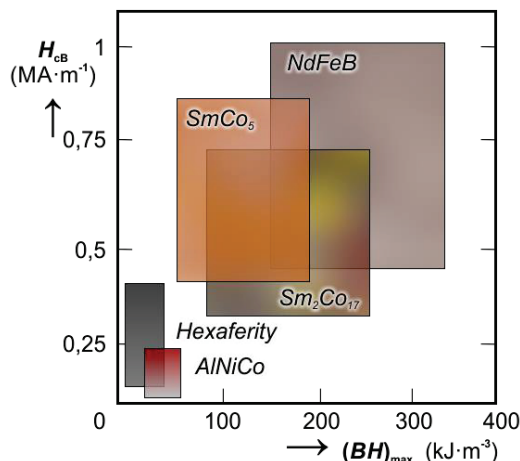
Obr. 13. Struktura NdFeB magnetu zvětšená 1000x [8]

$SmCo$ a $NdFeB$ patří do skupiny magnetů ze vzácných zemin. Ve srovnání s tradičními permanentními magnety jsou podstatně výkonnější a jsou založeny především na intermetalických sloučeninách z kovů ze vzácných zemin (např. samarium, neodym) a přechodových kovů (TM), např. kobalt, železo.

Mají významně vyšší hodnoty koercitivity H_{cJ} nebo remanence B_r nežli známé a osvědčené trvalé magnety jako jsou ocel, $AlNiCo$ a ferity. [8]

Tyto magnety umožňují značnou miniaturizaci rozměrů, protože dosáhnou stejné přídržné síly při mnohem menších rozměrech než např. feritové magnety. Širšímu uplatnění brání zejména vysoká cena surovin a náročnost technologického zpracování.

Využívají se v aplikacích, kde je potřeba vyvinout silnou magnetickou interakci (přídržnou sílu) nebo tam, kde záleží na malých rozměrech. Jsou to např. rotory a statory motorů, lineární motory, magnetické spojky a brzdy, magnetické polarizátory tekutin, magnetické separátory nebo zabezpečovací systémy. [4]



Obr. 14. Porovnání magnetických materiálů z hlediska H_{cB} a $(BH)_{\max}$ [4]

2.7. Hysterezní smyčka

Je odrazem změn uspořádání magnetických domén (Weissovy domény) v materiálu. Rozeznáváme v zásadě dva druhy těchto změn:

- posun doménových stěn
- rotaci vektorů magnetizace

Zatímco první mechanismus se uplatňuje zejména v oblasti nižších polí, druhý je významný v oblasti nasycení. [4]

Trvalý magnet je zpravidla charakterizován těmito základními parametry – koercitivitou H_c remanencí B_r a maximálním součinem $(BH)_{\max}$:

Koercitivita H_c ($A \cdot m^{-1}$):

Intenzita magnetického pole, která působí proti směru spontánní magnetizace, až dosáhne celkové indukce v materiálu $B = 0$. Parametr H_c je mírou odolnosti magnetu proti odagnetování (vnějším polem i vlastní demagnetizací).

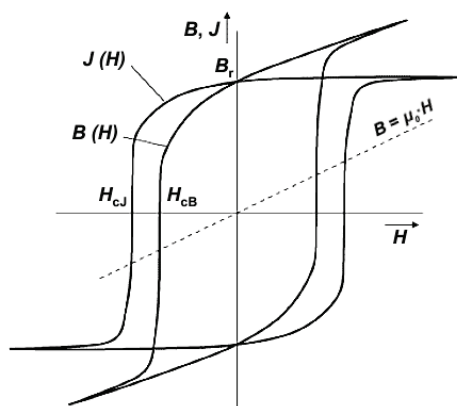
Remanence B_r (T):

Hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole.

Maximální součin $(BH)_{\max}$ ($kJ \cdot m^{-3}$):

Též maximální energetický součin, je úměrný magnetické energii uložené v magnetu optimálního tvaru. Parametr $(BH)_{\max}$ odpovídá interakční síle magnetu vůči jiným feromagnetickým předmětům (nejčastěji železu).

Z Obr. 15. vyplývá, že zatímco parametr B_r je pro oba typy křivek $B(H)$, $J(H)$ shodný, neplatí totéž pro parametr H_c a proto rozlišujeme koercitivitu H_{cJ} a koercitivitu H_{cB} . Závislost $B(H)$ se častěji využívá v technické praxi, závislost $J(H)$ slouží spíše v oblasti materiálového výzkumu. [4]



Obr. 15. Závislost $B(H)$ a $J(H)$ pro magneticky tvrdý materiál [4]

3. Softwarová příprava simulace

Pro vlastní návrh bylo nejprve zapotřebí výběru vhodného výpočtového programu. K tomuto účelu byl zvolen program „COMSOL Multiphysics v4.4“ pro svoji přehlednost, ovladatelnost a špičkové vlastnosti programového prostředí.

COMSOL Multiphysics je určen k modelování a simulaci fyzikálně-inženýrských úloh na bázi parciálních diferenciálních rovnic. Umožňuje definovat geometrii, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky pomocí funkcí nebo závisle proměnných - tyto definice mohou být proměnné v čase nebo prostoru. [11]

Pracovní postup při modelování dané úlohy lze shrnout v několika základních bodech:

1. Tvorba geometrie příslušného simulačního modelu
2. Definice okrajových podmínek a materiálových vlastností
3. Vygenerování výpočtové sítě - meshování
4. Řešení výpočtu pomocí metody konečných prvků
5. Koncové zpracování a export výsledků

3.1. Návrh a tvorba geometrie modelu

Jako první krok před návrhem je nutné vybrat danou fyziku společně s výběrem závislé proměnné, které jsou stěžejní pro zadávání patřičných okrajových podmínek v dané oblasti – pro tento případ tedy elektromagnetické pole (v programu označované jako *Magnetic and Electric Fields*) řešené stacionárně.

V dalším kroku přichází na řadu samotný návrh. Nejprve je vytvořena rovinná plocha, reprezentující permanentní magnet, složená z jednoho bloku kvádrů o ploše 120×120 mm a výšce 7,5 mm.

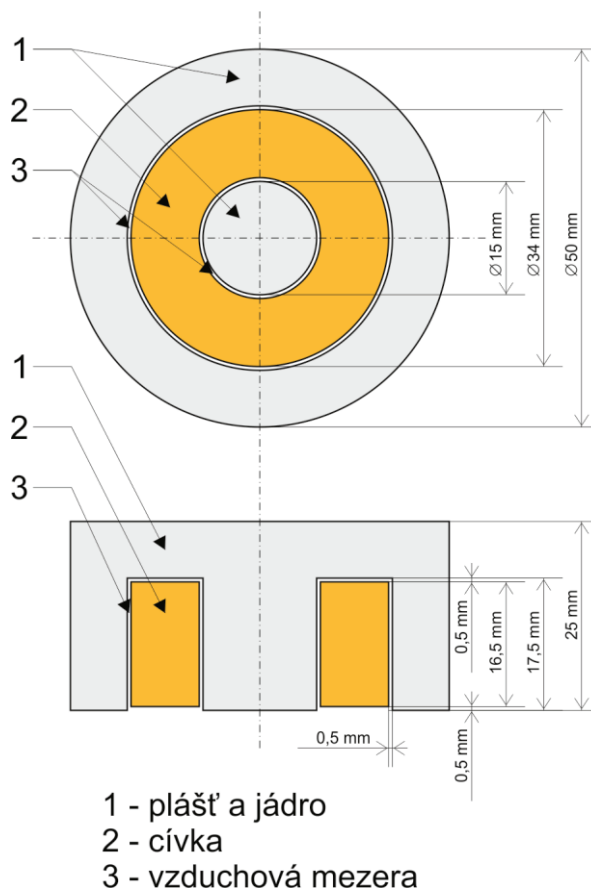
Nad touto plochou v prozatímní výšce 5 mm byl zvolen a navrhnut přídržný elektromagnet o průměru vnějšího pláště 50 mm a výšce 25 mm. O těchto rozměrech byl vytvořen odpovídající válec.

Do tohoto vytvořeného válce se za pomoci válcového mezikruží vytvoří prostor určený pro cívku elektromagnetu. Objekt válcového mezikruží je tvořen ze dvou válců o průměrech 35 mm a 15 mm o výšce 17,5 mm, z nichž válec o menším průměru je za použití funkce „Difference“ tzv. „vyříznut“ z objemu válce o větším průměru.

Po vytvoření tohoto válcového mezikruží je za pomoci stejné funkce „Difference“ z původního objemu válce „vyříznut“ objem mezikruží, čímž vznikne prostor pro cívku elektromagnetu a zároveň objekt představující plášť a jádro elektromagnetu.

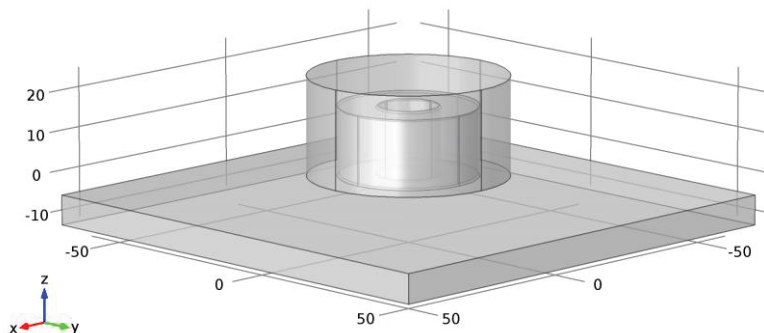
Do vzniklého prostoru mezi pláštěm a jádrem se vytvoří cívka elektromagnetu představující další objekt válcového mezikruží o vnějším průměru 34 mm, vnitřním průměru 16 mm a výšce 16,5 mm.

Plášť a jádro společně s cívkou mají vůči sobě záměrně vytvořenou vzduchovou mezeru o velikosti 0,5 mm z důvodu reálnější simulace.

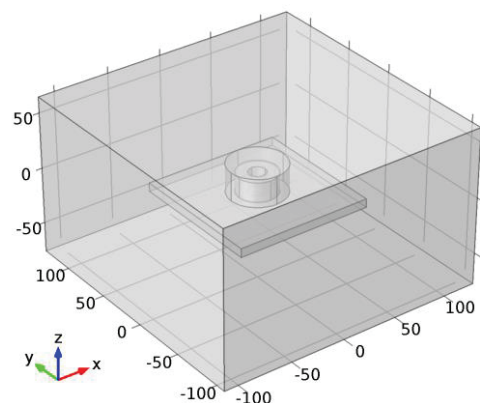


Obr. 16. Pohled v řezu elektromagnetem s vyznačenými kótami v měřítku M1:1

Na závěr tvorby je zapotřebí vytvořit ještě jeden větší kvádr reprezentující vzduch, který obklopuje veškeré vytvořené objekty.



Obr. 17. Perspektivní zobrazení elektromagnetu s permanentním magnetem



Obr. 18. Celkové zobrazení modelu

3.2. Přiřazení materiálových vlastností

Dalším bodem pracovního postupu je přiřazení materiálů společně s jejich vlastnostmi k jednotlivým již vytvořeným objektům. Celkem jde o 4 objekty – vzduch, plášť s jádrem, cívka a permanentní magnet.

V Comsolu máme v podstatě 2 možnosti pro definování materiálu pro určitý objekt, a to buď konkrétním výběrem a přiřazením daného materiálu z materiálové knihovny programu Comsol, který v sobě zahrnuje již převážnou část nadefinovaných podmínek (které se dají libovolně upravovat), anebo vytvořit zcela vlastní materiál. Zde se ve všech případech vychází z první varianty.

Vzduch:

Jedna z podmínek pro uskutečnění výpočtu je vytvoření objektu jako prostoru s obsahem vzduchu. V rámci programu jde víceméně o neutrální materiál, který posléze nastaví danému přiřazenému objektu (jeho vnitřním stěnám) vlastnost hranice magnetické izolace. Ta je dána vztahem:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

Kde \mathbf{n} udává jednotkový vektor normálové plochy a \mathbf{A} vektorový magnetický potenciál. [2]

Tab. 1. Základní vlastnosti materiálu - vzduch

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotka
Elektrická vodivost	σ	0	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Relativní permeabilita	μ_r	1	-

Materiál *Vzduch* se nachází standardně v materiálové knihovně programu Comsol.

Plášť s jádrem:

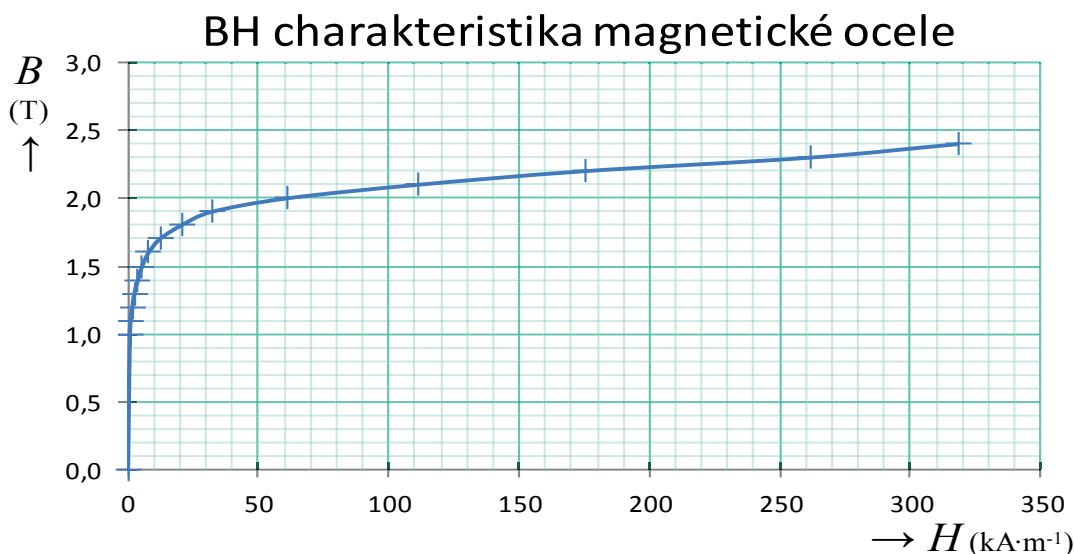
Pro tento objekt je přiřazen materiál *Ocel*. Pro funkci elektromagnetu je vyžadováno, aby měl plášť s jádrem složení z magneticky měkkého materiálu. Jako podklad pro užitý materiál byl vybrán z materiálové knihovny materiál „Soft iron“ (beze ztrát).

Tab. 2. Základní vlastnosti materiálu - ocel

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotka
Elektrická vodivost	σ	0	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Relativní permeabilita	μ_r	4000	-

K interpretaci funkce magnetického materiálu je zapotřebí mít ve vlastnostech materiálu určenou relativní permeabilitu spolu s patřičným nadefinovaným průběhem BH charakteristiky. Hodnota relativní permeability byla zvolena 4000 pro simulaci železného jádra.

Průběh BH charakteristiky byl převzat z již nadefinovaného obsahu materiálu „Soft iron“.



Obr. 19. BH charakteristika magneticky měkké ocele „Soft iron“

Cívka:

Objekt cívky je přirozeně tvořen materiálem *Měď*. Tento materiál je též obsahem materiálové knihovny.

Tab. 3. Základní vlastnosti materiálu - měď

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotka
Elektrická vodivost	σ	$5,998 \cdot 10^7$	$S \cdot m^{-1}$
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Relativní permeabilita	μ_r	1	-

Její hlavní vlastností, která se musí zvolit, je hodnota proudové hustoty (v programu označována *External Current Density*), jež udává hodnotu proudu tekoucí materiálem cívky, který budí magnetický tok v plášti a jádru elektromagnetu, na jednotku plochy. Hodnota je vypočtena ze vztahu:

$$J = \frac{I}{S} \quad (A \cdot m^{-2}; A, m) \quad (3)$$

Kde S značí plochu příčného průřezu poloměrem cívky a I proud. Hodnota proudu pro výpočet byla zvolena 2 A.

$$J = \frac{I}{S} = \frac{2}{8 \cdot 16,5 \cdot 10^{-6}} \doteq 15151,5 A \cdot m^{-2}$$

Ve vlastnostech pro proudovou hustotu se ještě dále volí souřadnice x, y, z , ve kterých má tato proudová hustota působit. Pro simulaci byly zvoleny souřadnice x, y (ty stanovují tok proudu v horizontálním směru, jak lze odvodit z Obr. 17., 18.).

Permanentní magnet:

Jako poslední z objektů je na řadě permanentní magnet v podobě rovinné plochy. Byly vybrány 2 materiály, které budou postupně tvořit tento objekt, a to magnety ze vzácných zemin – *NdFeB* a *SmCo*. Tyto konkrétní materiály se přímo nenalézají v materiálové knihovně, a byly proto stejně jako *Ocel* vytvořeny z podkladového materiálu „Soft iron“.

Tab. 4. Základní vlastnosti materiálu - *NdFeB*

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotka
Elektrická vodivost	σ	0	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Relativní permeabilita	μ_r	1,089	-

Tab. 5. Základní vlastnosti materiálu - *SmCo*

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotka
Elektrická vodivost	σ	0	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Relativní permeabilita	μ_r	0,3088	-

Obdobně jako u materiálu *Ocel* je zapotřebí pro oba materiály nadefinovat jejich vlastnosti, a to relativní permeabilitu a BH charakteristiky. Relativní permeability byly vypočteny ze vztahu:

$$B = \mu \cdot H \Rightarrow \mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0} \quad (4)$$

Hodnoty permeabilit pro *NdFeB* a *SmCo* jsou vypočteny následovně:

$$\mu_{r \text{ NdFeB}} = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0} = \frac{1,224}{894,2 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \doteq 1,089$$

$$\mu_{r \text{ SmCo}} = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0} = \frac{0,97}{2500 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \doteq 0,3088$$

Hodnoty magnetické indukce B a magnetické intenzity H ve vzorcích jsou maximální hodnoty vyňaté z patřičných BH charakteristik (hodnota remanence B_r a koercitivity H_c).

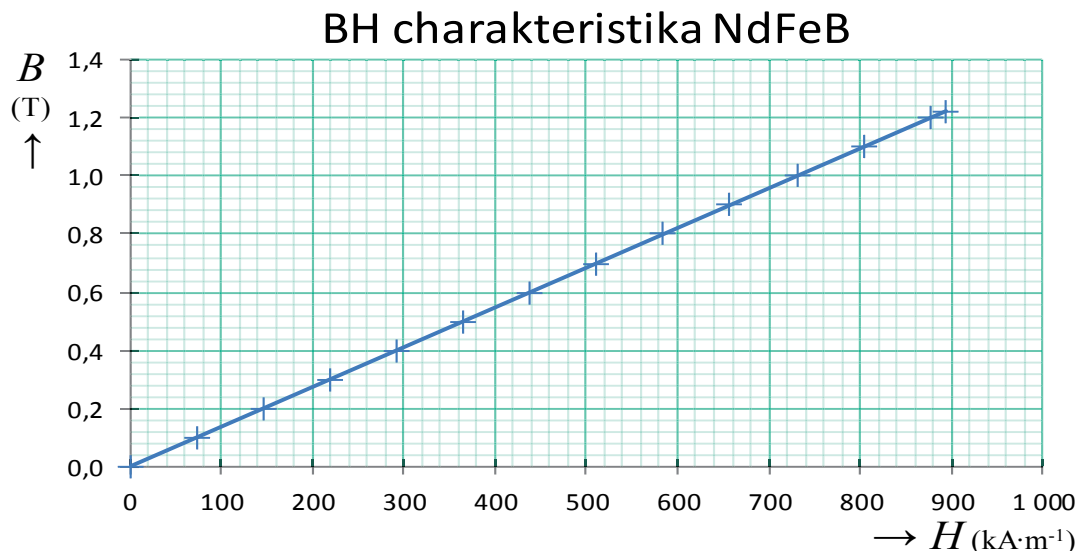
Užité BH charakteristiky pro definování magnetických vlastností obou materiálů byly přímo měřeny. Průběh BH charakteristiky materiálu *NdFeB* byl v rámci univerzity změřen na měřicím přístroji „Permagraph-C“ a naměřená data průběhu BH charakteristiky *SmCo* byla převzata.



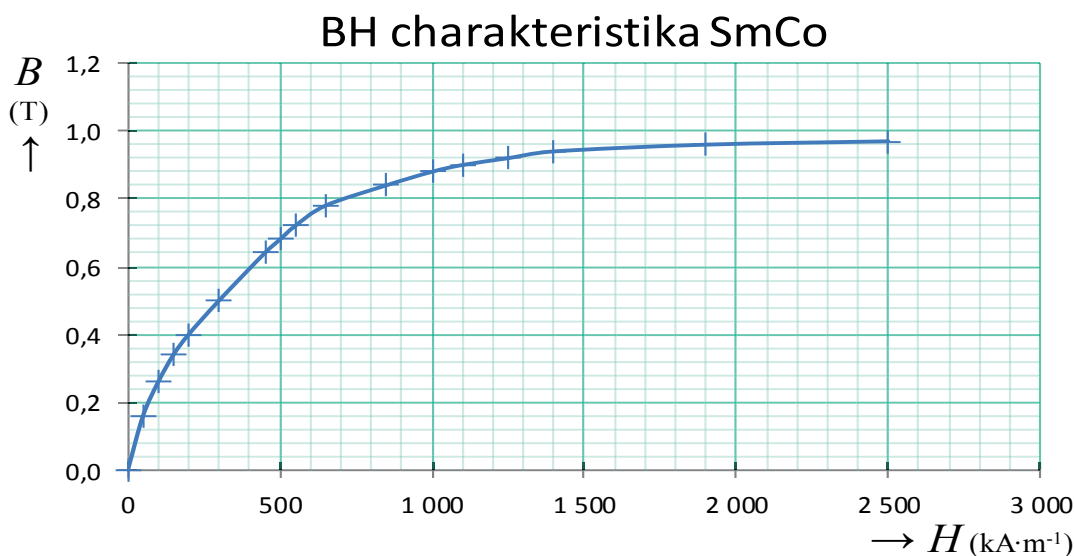
Obr. 20. Měřicí soustrojí „Permagraph-C“ [13]

Tento měřicí přístroj zjišťuje magnetické vlastnosti a chování daných permanentních magnetů ve statickém magnetickém poli do intenzity $1600 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ v teplotním rozsahu do 200°C [6].

Při zadávání těchto dat do nastavení vlastností jednoho z materiálů, které tvoří naměřenou BH charakteristiku daného permanentního magnetu, vyžaduje program Comsol zadávání do dvou typů tabulek. Nejprve do první tabulky jako magnetickou indukci, která je funkcí magnetické intenzity $B = f(H)$ (tedy klasickou BH charakteristiku ve druhém kvadrantu), a do druhé tabulky jako magnetickou intenzitu, která je funkcí magnetické indukce $H = f(B)$ (což je prakticky totožná tabulka s prohozenými hodnotami B a H).



Obr. 21. BH charakteristika permanentního magnetu NdFeB



Obr. 22. BH charakteristika permanentního magnetu SmCo₅ [6]

Jedna z vlastností, kterou je dále nutné určit u obou materiálů, je hodnota remanentní indukce B_r , která se zadává v levém postranním menu v položce Ampérova zákona (v programu označena jako *Ampère's law*) – jde o výpočet dle první Maxwellovy rovnice:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5)$$

Kde $\text{rot } \mathbf{H}$ značí rotaci vektoru magnetické intenzity, \mathbf{J} hustotu vodivého proudu a $\partial \mathbf{D} / \partial t$ hustotu posuvného proudu. [2]

Zadáním hodnoty B_r (z příslušné BH charakteristiky) se určuje polarita daného magnetu, a to zadáním buď jeho kladné, nebo naopak záporné hodnoty. Obdobně jako u cívky se dále může

zvolit působení v souřadnicích x, y, z . Pro simulaci bylo zvoleno působení pouze ve směru souřadnice z (tedy ve vertikálním směru).

Poslední věcí nutnou k přiřazení je určení objektů, pro které bude probíhat vyhodnocování silového působení způsobené elektromagnetismem. Tato výpočtová vlastnost se v Comsolu dodatečně vybere v levém postranním menu kliknutím pravého tlačítka myši na položku vybrané výpočtové fyziky (*Magnetic and Electric Fields*) a zvolením položky *Výpočet sil* (v programu označována *Force calculation*).

Po vybrání dané položky se poté určí objekty, pro které bude toto silové působení počítáno – tedy výpočet bude směřován na objekty zahrnující elektromagnet (plášť s jádrem a cívkou). Metoda výpočtu probíhá dle odvozeného integračního vzorce z Maxwellova tenzoru pnutí:

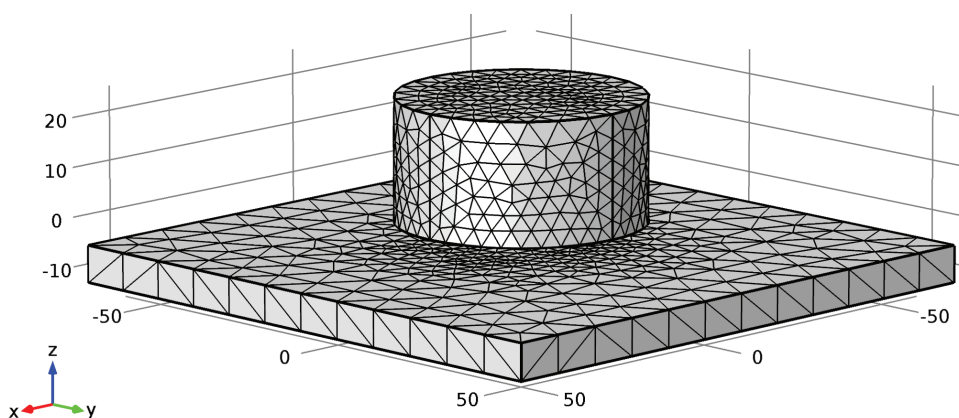
$$\mathbf{F} = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \mathbf{T} dS \quad (\text{N}) \quad (6)$$

Kde \mathbf{n} udává jednotkový vektor normálové plochy, \mathbf{T} Maxwellův magnetický tenzor pnutí a S společně s $\partial\Omega$ výpočtovou plochu. [5]

3.3. Meshování

Závěrem přípravy softwarové simulace je tzv. meshing. Ve své podstatě jde o zpracování povrchu veškerých objektů do provázané polygonové sítě tvořící trojúhelníkové elementy, která zahrnuje výpočtovou základnu pro všechny budoucí výpočty.

Tyto výpočty ve formě parciálních diferenciálních rovnic jsou konkrétně počítány ve všech vytvořených uzlových bodech sítě – metoda konečných prvků.



Obr. 23. Perspektivní zobrazení vygenerované výpočtové sítě elektromagnetu a permanentního magnetu

Program Comsol umožňuje generování této sítě standardně automaticky. V základní nabídce pro meshování je k dispozici zvolení kvality generování sítě, respektive zvolení velikosti výpočtových elementů v rámci 9 stupňů od *Extrémně jemné* po *Extrémně hrubou* kvalitu, kde 5. stupeň je *Normální* kvalita. Pro konkrétní simulační model této práce na Obr. 23. byl zvolen 7. stupeň kvality *Jemnější*. Nastavením vyššího stupně kvality se již přesnost výpočtu oproti nastavenému stupni prakticky neliší a navíc při zvolení vyššího stupně dochází k výrazně časově náročnějším výpočtům.

Pokud je třeba, je možné tuto síť vytvořit nebo upravit zcela libovolně dle svého vlastního uvážení, např. pokud je více naléháno na konkrétní část nebo oblast určitého objektu, je možné v daném místě navolit hustotu výpočtové sítě a zpřesnit tak konečný výpočet.

4. Výpočet simulace a zpracování výsledků

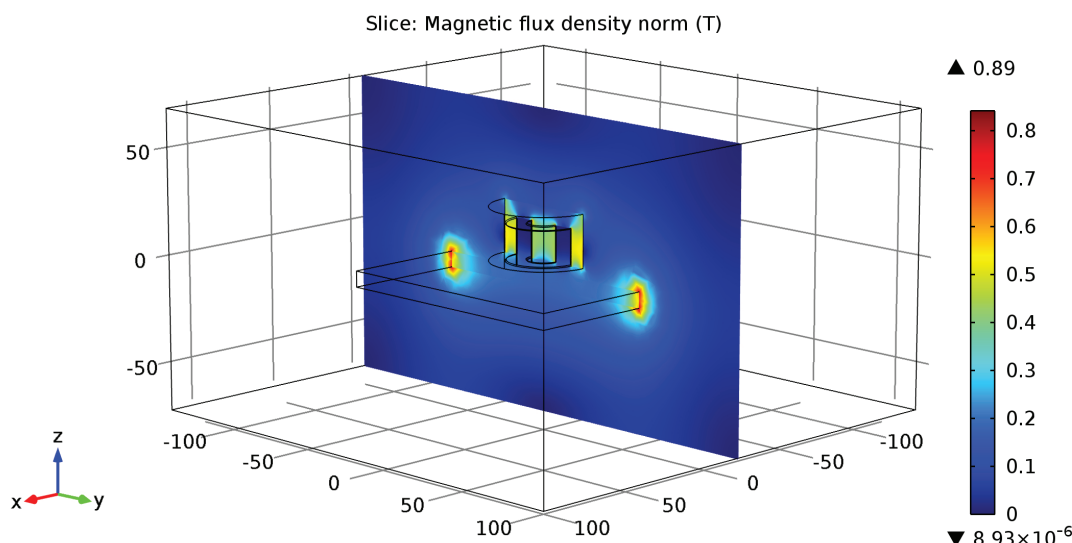
Po předchozích nastaveních a vytvoření potřebných náležitostí se již přistupuje k samotnému řešení výpočtů a simulaci. Program Comsol využívá pro výpočty metody tzv. „Stacionárního řešiče“, zkráceně „SOR“.

Metoda *SOR* poskytuje jednoduchý a pro výpočtovou paměť efektivní řešitel vycházející z klasických iteračních metod pro řešení soustav lineárních rovnic, které lze pomocí maticového zápisu zapsat jako:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (7)$$

Kde \mathbf{A} je regulační matice ($\mathbf{n} \times \mathbf{n}$), \mathbf{x} vektor neznámých a \mathbf{b} vektor pravých stran. [12]

V rámci jednoho kroku výpočtů, tj. výpočet pro jednu určitou vzdálenost elektromagnetu od permanentního magnetu, bylo celkem vytvářeno přes 1.532.338 stupňů volnosti² za střední dobu trvání výpočtu 2 minut 39 sekund.



Obr. 24. Perspektivní náhled zobrazení finálního výpočtu magnetické indukce skrze celý model

Simulace obsahuje výpočty pro magnetickou indukci, magnetickou intenzitu, Lorentzovu sílu a sílu interakce elektromagnetu.

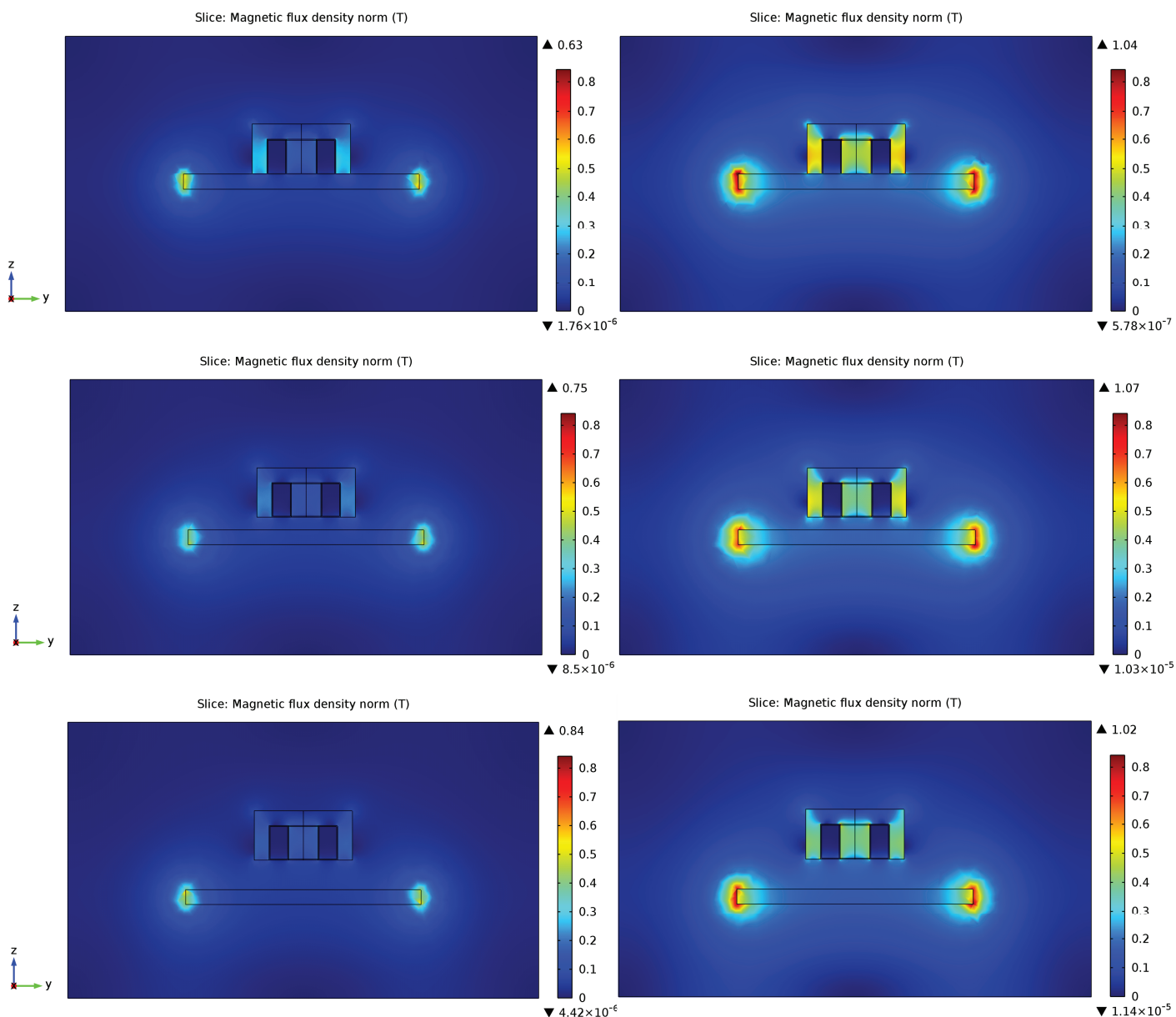
Tyto výpočty byly jednak prováděny pro jednotlivé výšky vzduchové mezery nacházející se mezi permanentním magnetem a elektromagnetem, a to o velikostech od 0,5 mm do 10 mm po kroku 0,5 mm, dále ještě ve výškách 15 mm, 20 mm, 25 mm, a zároveň byly porovnávány pro 2 typy permanentních magnetů *NdFeB* a *SmCo*. Bylo tedy provedeno celkem 46 výpočtů.

Veškerý export výsledků výše zmíněných výpočtů z programu Comsol pro všechny velikosti vzduchové mezery je umístěn v přílohách pod označením „Příloha č. 1 až č. 28“.

4.1. Magnetická indukce

Na následujících vyexportovaných obrázcích z programu Comsol jsou vyobrazeny velikosti působení magnetických indukci procházející skrze celý model ve výškách $\delta = 0,5$ mm; 6,5 mm; 15 mm, ve srovnání s oběma permanentními magnety – v levém sloupci jsou výsledky pro permanentní magnet *NdFeB* a v pravém sloupci pro permanentní magnet *SmCo*:

² Stupně volnosti určují celkový počet uzlů vytvořených při meshování, ve kterých jsou jednotlivě prováděny příslušné parciální diferenciální výpočty.



Obr. 25. Ukázka srovnání velikostí působení magnetických indukcí procházející modelem v řezu pro velikosti vzduchové mezery $\delta = 0,5$ mm; 6,5 mm; 15 mm
levý sloupec: NdFeB, viz Příloha č. 1 – 3; pravý sloupec: SmCo, viz Příloha č. 5 – 7

Dle výsledků výše je zjevné, že magnetická indukce je ve všech výsledcích nejintenzivnější na okrajích roviny permanentního magnetu, kde magnetická indukce dosahuje krajních hodnot dle materiálového typu permanentního magnetu.

Pro materiál **NdFeB** dosahuje magnetická indukce těsně na okrajích povrchu permanentního magnetu hodnoty $B = 0,63$ T pro nejmenší vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm (viz Obr. 25, první řádek, levý sloupec) až hodnoty $B = 0,84$ T pro největší vzduchové mezery $\delta > 15$ mm (viz Příloha č. 3). Magnetická indukce, která je od těchto okrajů více rozptýlená, dosahuje pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm hodnot $B \approx 0,3 - 0,58$ T a pro všechny vyšší vzduchové mezery hodnot $B \approx 0,3 - 0,4$ T. Znamená to, že vlivem elektromagnetu je u permanentního magnetu **NdFeB** koncentrace magnetické indukce těsně na povrchu okrajů nejvyšší pro největší vzdálenosti vzduchové mezery, kdežto koncentrace magnetické indukce kolem okrajů je nejvyšší pro nejmenší vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm a s jejím nárůstem tato indukce klesá.

Pro materiál **SmCo** dosahuje magnetická indukce na okrajích permanentního magnetu pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm hodnot $B \approx 0,3 - 1,04$ T (viz Obr. 25, první řádek, pravý sloupec) až pro vzduchovou mezeru $\delta > 25$ mm hodnot $B \approx 0,45 - 0,86$ T (viz Příloha č. 7), kde pro vzduchovou mezeru $\delta = 6,5$ mm dosahuje magnetická indukce na okrajích permanentního magnetu nejkrajnějších hodnot $B \approx 0,3 - 1,07$ T (viz Obr. 25, druhý řádek, pravý sloupec). Tzn., že při rostoucí výšce vzduchové mezery do hodnoty $\delta = 5$ mm magnetická indukce na okrajích permanentního magnetu **SmCo** nejprve klesá, poté nastane její krátkodobý růst do hodnoty $\delta = 6,5$ mm a dále vykazuje pozvolný pokles.

Další oblast o intenzivnější magnetické indukci vykazuje plášť (obvodové okraje pláště) společně s jádrem elektromagnetu. Se zvyšující se vzdáleností elektromagnetu od permanentního magnetu postupně dochází k poklesu působení této magnetické indukce.

Magnetická indukce v obvodovém plášti elektromagnetu, s vlivem permanentního magnetu **NdFeB**, vychází pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm hodnota $B \approx 0,34$ T a v jádře elektromagnetu hodnota $B \approx 0,16 - 0,26$ T (viz Obr. 25, první řádek, levý sloupec). V porovnání například se vzduchovou mezerou $\delta = 6,5$ mm vychází pokles hodnoty magnetické indukce $B \approx 0,26$ T a v jádře $B \approx 0,12 - 0,2$ T (viz Obr. 25, druhý řádek, levý sloupec) – přibližně stejné konstantní hodnoty magnetické indukce vykazuje elektromagnet v rozmezí velikosti vzduchové mezery $\delta = 1 - 10$ mm s výjimkou $\delta = 5$ mm (viz Příloha č. 2), kde dochází k mírnému nárůstu magnetické indukce v obvodovém plášti elektromagnetu na hodnotu $B \approx 0,31$ T (tedy přibližně stejně velkou jako pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm). Při výškách vzduchové mezery $\delta > 10$ mm dochází k mírnému poklesu této magnetické indukce (viz Příloha č. 3).

V obvodovém plášti a jádře elektromagnetu, s vlivem permanentního magnetu **SmCo**, vychází magnetická indukce, s porovnáním předchozích výsledků (pro elektromagnet s vlivem permanentního magnetu **NdFeB**), o zcela jiných hodnotách. Pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm vychází v obvodovém plášti hodnota indukce $B \approx 0,58$ T, v jádře $B \approx 0,48$ T a místy v ostrých rozích dosahuje hodnota indukce až $B \approx 0,7 - 0,83$ T (viz Obr. 25, první řádek, pravý sloupec). Pro vyšší hodnoty vzduchové mezery indukce elektromagnetu slábne, například pro vzduchovou mezeru $\delta = 6,5$ mm vychází magnetická indukce pro obvodový plášť $B \approx 0,54$ T, v jádře $B \approx 0,42$ T (viz Obr. 25, druhý řádek, pravý sloupec) a pro vzduchové mezery $\delta > 25$ mm již celkově indukce v plášti a v jádře klesá pod hodnoty $B \approx 0,35$ T (viz Příloha č. 7).

Ve vrchní části pláště elektromagnetu, s vlivem obou typů permanentních magnetů, dosahuje magnetická indukce velmi malých hodnot nezávisle na výšce vzduchové mezery. Magnetická indukce s vlivem **NdFeB** se v této části pohybuje kolem hodnoty $B \approx 0,1 - 0,2$ T a s vlivem **SmCo** kolem hodnoty $B \approx 0,2 - 0,3$ T.

Oblastmi s nejméně intenzivní magnetickou indukcí jsou přirozeně vzduchová mezera, vzdušné okolí elektromagnetu a permanentního magnetu, a oblast cívky elektromagnetu dosahující téměř nulových hodnot.

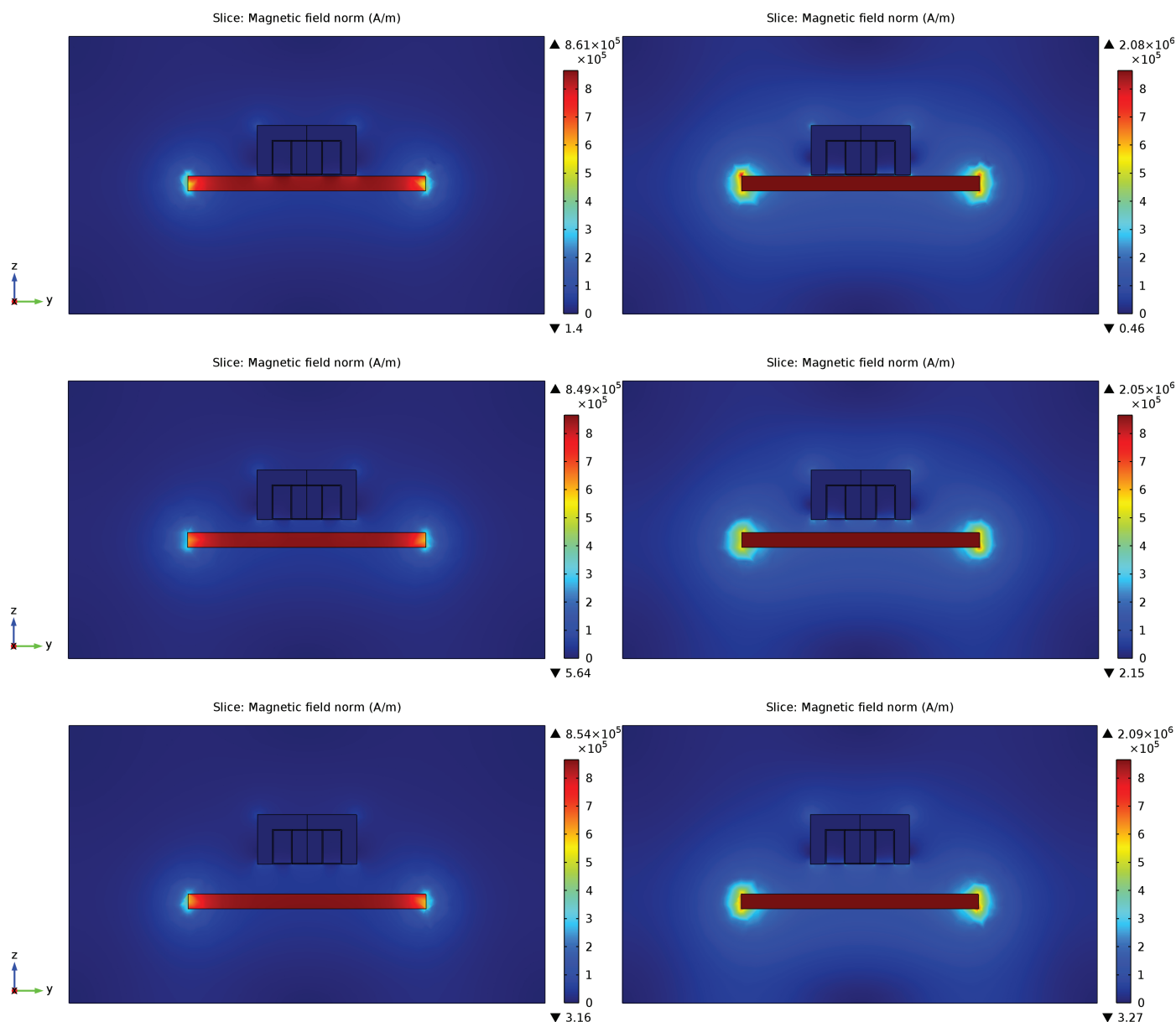
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře s vlivem permanentního magnetu **NdFeB**, při povrchu pláště a jádra elektromagnetu, dosahuje hodnot $B \approx 0,18$ T pro malé vzduchové mezery, pro větší vzduchové mezery klesá (při $\delta > 25$ mm dosahuje $B \approx 0,1$ T). V prostoru vzduchové mezery a obecně kolem i skrz celou plochu permanentního magnetu v rozsahu všech výšek dosahuje magnetická indukce hodnot $B \approx 0,1$ T.

Pro magnetickou indukci vzduchové mezery s vlivem permanentního magnetu **SmCo**, při povrchu pláště a jádra elektromagnetu, dosahuje hodnot $B \approx 0,46$ T pro malé vzduchové mezery a pro větší vzduchové mezery též klesá (při $\delta > 25$ mm dosahuje $B \approx 0,3$ T). V prostoru vzduchové mezery a též kolem i skrz plochu permanentního magnetu v rozsahu všech výšek dosahuje magnetická indukce hodnot $B \approx 0,1 - 0,25$ T.

Celkově vyšších hodnot magnetické indukce vykazuje elektromagnet společně s permanentním magnetem **SmCo**. Dá se tvrdit, že magnetická indukce je celkem pro všechny výsledky přibližně 2-krát větší než pro permanentní magnet **NdFeB**. Přehled vyexportovaných obrázků magnetické indukce je vyobrazen v Příloze č. 1 – č. 8 včetně zobrazení magnetické indukce působící v elektromagnetu na okraji mezi vnější stěnou pláště a stěnou cívky, která nabývá stejných hodnot jako plášť elektromagnetu (Příloha č. 4, č. 8).

4.2. Magnetická intenzita

Dále jsou vyobrazeny obrázky s velikostí působení magnetických intenzit, procházející také skrz celý model ve vybraných výškách, rovněž ve srovnání s oběma permanentními magnety – v levém sloupci jsou výsledky pro permanentní magnet $NdFeB$, v pravém $SmCo$:



Obr. 26. Náhled srovnání velikostí působení polí magnetických intenzit procházející modelem v řezu pro velikosti vzduchové mezery $\delta = 0,5 \text{ mm}$; $6,5 \text{ mm}$; 15 mm
levý sloupec: $NdFeB$, viz Příloha č. 9 – 11; pravý sloupec: $SmCo$, viz Příloha č. 13 – 15

Nejintenzivnější působení magnetické intenzity je soustředěno v objemu permanentního magnetu u obou materiálových typů, kde se hodnoty magnetických intenzit téměř blíží k jejich koercitivním hodnotám. V tomto objemu permanentního magnetu postupně směrem k okrajům hodnota magnetické intenzity zeslabuje. Toto platí pro všechny výšky vzduchových mezer, avšak s jejich změnou se maxima těchto magnetických intenzit mění.

Při postupném snižování výšky vzduchové mezery permanentního magnetu **NdFeB** z $\delta = 25$ mm na nižší je zjevné (viz *Příloha č. 10 – 11*), že dochází k pozvolnému zeslabování magnetické intenzity v celém objemu permanentního magnetu z hodnoty $H \approx 860 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ až na hodnotu $H \approx 847 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ odpovídající vzduchové mezeře $\delta = 4,5$ mm (viz *Příloha č. 9*). Od této vzduchové mezery níže dochází jednak k dalšímu zeslabování magnetické intenzity v blízkosti pláště a jádra elektromagnetu, které v těchto místech při vzduchové mezeře $\delta = 0,5$ mm zeslabuje hodnotu magnetické intenzity na $H \approx 800 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, a jednak zároveň dochází k zesilování magnetické intenzity v objemu permanentního magnetu, v místech v blízkosti cívky elektromagnetu na hodnotu $H \approx 861 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz *Obr. 26*, první řádek, levý sloupec). Okraje vně objemu permanentního magnetu dosahují magnetických intenzit $H \approx 530 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.

U permanentního magnetu **SmCo** dochází taktéž k pozvolnému zeslabování magnetické intenzity v celém objemu permanentního magnetu při snižování výšky vzduchové mezery z $\delta = 25$ mm na nižší (viz *Příloha č. 14 – 15*), kde hodnota od této vzduchové mezery nabývá ještě hodnoty $H \approx 2,13 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-1}$. Při snížení výšky vzduchové mezery na $\delta = 4 – 6$ mm nabývá magnetická intenzita hodnot $H \approx 2,04 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-1}$, kde totožně jako pro **NdFeB** dochází ke snižování magnetické intenzity v objemu permanentního magnetu v místech v blízkosti pláště a jádra elektromagnetu až na hodnotu $H \approx 1,82 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-1}$ pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm, a taktéž k zesilování magnetické intenzity v místech v blízkosti cívky elektromagnetu na hodnotu $H \approx 2,08 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz *Obr. 26*, první řádek, pravý sloupec; *Příloha č. 13*). Okraje vně objemu permanentního magnetu dosahují intenzit $H \approx 950 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.

Oblasti o vyšších hodnotách intenzit jsou dále kolem okrajů permanentního magnetu a ve vzduchové mezeře při dolním vnějším okraji pláště a jádra elektromagnetu.

U permanentního magnetu **NdFeB** dosahují hodnoty magnetické intenzity kolem jeho vnějších okrajů $H \approx 250 – 430 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ při vzduchové mezeře $\delta = 0,5$ mm (viz *Obr. 26*, první řádek, levý sloupec), pro vzduchové mezery $\delta > 0,5$ mm tyto hodnoty magnetické intenzity pozvolna klesají na $H \approx 200 – 330 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz *Příloha č. 9 – 11*). Magnetické intenzity ve vzduchové mezeře při povrchu pláště a jádra elektromagnetu nabývají pro výšku $\delta = 0,5$ mm hodnot $H \approx 164 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ a se zvyšující se vzduchovou mezerou tato intenzita postupně slábne až do výšky $\delta = 4$ mm, kde se magnetická intenzita více ustálí a slábne pouze mírně. V porovnání výšek například $\delta = 4$ mm a $\delta = 10$ mm dosahuje magnetická intenzita pro $\delta = 4$ mm hodnoty $H \approx 110 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ a pro $\delta = 10$ mm při tomto povrchu elektromagnetu hodnoty $H \approx 102 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (*Příloha č. 9 – 11*). Od vzduchové mezery $\delta > 10$ mm dochází opět k většímu poklesu magnetické intenzity.

Pro permanentní magnet **SmCo** dosahují hodnoty magnetické intenzity kolem jeho vnějších okrajů $H \approx 300 – 820 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ při vzduchové mezeře $\delta = 0,5$ mm (viz *Obr. 26*, první řádek, pravý sloupec), pro vzduchové mezery $\delta > 0,5$ mm tyto hodnoty magnetické intenzity pozvolna klesají na $H \approx 300 – 600 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz *Příloha č. 13 – 15*). Magnetické intenzity ve vzduchové mezeře při povrchu pláště a jádra elektromagnetu nabývají pro výšku $\delta = 0,5$ mm hodnot $H \approx 395 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ a se zvyšující se vzduchovou mezerou tato intenzita taktéž slábne do výšky $\delta = 4$ mm, kde se stejně jako u **NdFeB** magnetická intenzita více ustálí a slábne pouze mírně. V porovnání výšek $\delta = 4$ mm a $\delta = 10$ mm dosahuje magnetická intenzita pro $\delta = 4$ mm hodnoty $H \approx 300 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ a pro $\delta = 10$ mm hodnoty $H \approx 290 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (*Příloha č. 13 – 15*). Od vzduchové mezery $\delta > 10$ mm taktéž dochází k většímu poklesu magnetické intenzity.

Oblasti s nejmenším působením magnetické intenzity se nachází v okolí povrchu permanentního magnetu a v celém objemu elektromagnetu.

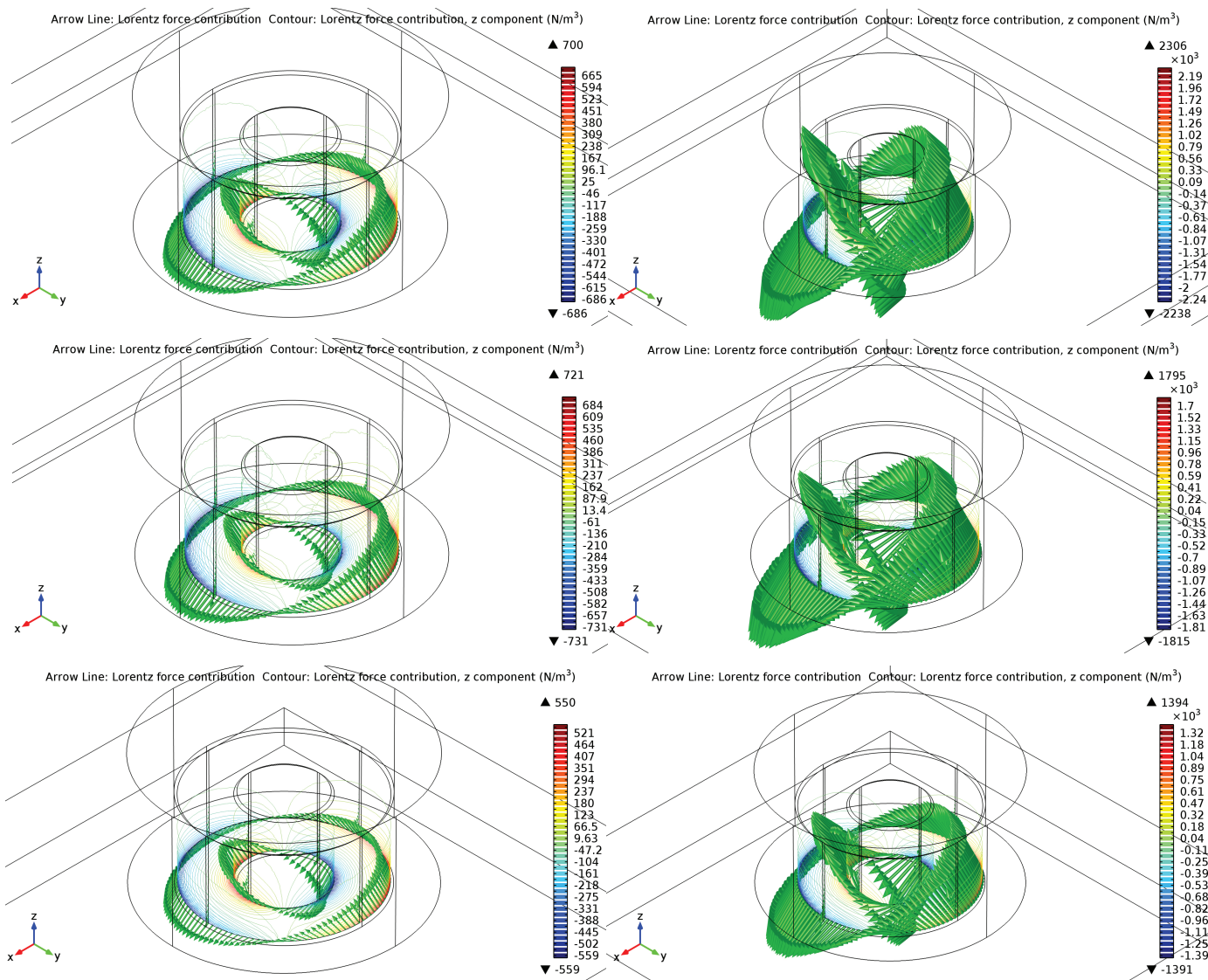
Kolem povrchu permanentního magnetu **NdFeB** dosahuje pole magnetické intenzity hodnot $H \approx 70 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Totožných hodnot dosahují vzduchové mezery při výškách $\delta > 10$ mm. V prostoru pláště a jádra elektromagnetu dosahují hodnoty magnetických intenzit v poměru s ostatními hodnotami intenzit velmi nízkých hodnot ($H \approx 26 – 54 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$) a v prostoru pro cívku elektromagnetu téměř nulových hodnot.

Pro permanentní magnet **SmCo** dosahuje pole magnetické intenzity kolem jeho povrchu hodnot $H \approx 140 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Totožné hodnoty dosahují také vzduchové mezery $\delta > 10 \text{ mm}$. V plášti a jádru elektromagnetu jsou hodnoty magnetických intenzit v poměru s ostatními hodnotami intenzit též velmi nízké ($H \approx 80 - 112 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$) a v prostoru pro cívku elektromagnetu téměř nulové.

Jako v předchozí kapitole pro magnetickou indukci, obdobně i zde vykazuje vliv permanentního magnetu **SmCo** vyšších hodnot magnetických intenzit oproti **NdFeB** přibližně 2-krát (mimo magnetické intenzity soustředěných v jejich objemu). Přehled vyexportovaných obrázků magnetických intenzit je vyobrazen v Příloze č. 9 – č. 16 včetně zobrazení působení intenzity kolem elektromagnetu procházející okrajem vnější stěny pláště a stěnou cívky.

4.3. Lorentzova síla

Na obrázcích níže je vyobrazen náhled působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu pro výšky vzduchové mezery $\delta = 0,5 \text{ mm}$; $6,5 \text{ mm}$; 25 mm , pro oba permanentní magnety – v levém sloupci **NdFeB** a v pravém sloupci **SmCo**:



Obr. 27. Náhled srovnání velikostí a směrů působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu pro velikosti vzduchové mezery $\delta = 0,5 \text{ mm}$; $6,5 \text{ mm}$; 25 mm levý sloupec: **NdFeB**, viz Příloha č. 17 – 19; pravý sloupec: **SmCo**, viz Příloha č. 20 – 22

Jako Lorentzova síla je označeno silové působení na objem masivního proudovodiče (v našem případě objem cívky), jímž protéká proud I o proudové hustotě \mathbf{J} , nacházející se v lineárním magneticky homogenním poli s působící magnetickou indukcí \mathbf{B} .

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (\text{N}) \quad (8)$$

Rovnici (6) lze napsat i jako působení objemové hustoty síly na vodiče cívky: [2], [5]

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV \quad (\text{N}) \rightarrow \mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (9)$$

Z rovnic pro Lorentzovu sílu vyplývá, že výpočet síly je závislý na proudové hustotě proudu. V rámci práce je tato hodnota po celou dobu konstantní a ve výsledcích tedy jsou vyobrazeny změny sil úměrné změně magnetické indukce a tedy i v závislosti na různých výškách vzduchových mezer.

Působení Lorentzovy síly vychází z okrajů spodního dna cívky elektromagnetu a nabývá nejvyšších hodnot při malých velikostech vzduchové mezery. Tato síla s nárůstem výšky postupně slábne. Směr působení této síly je dvojitý – jak je vidět na Obr. 27, jedna polovina elementů sil působí směrem vzhůru (zelené šipky s počátkem v barevných konturách blízké červenému spektru; kladné hodnoty), druhá polovina směrem dolů (zelené šipky s počátkem v barevných konturách blízké modrému spektru; záporné hodnoty) a to obě pod určitým úhlem. Všechny tyto elementy sil, které působí rozdílnými směry, jsou na sebe navzájem kolmé. S postupně rostoucí výškou vzduchové mezery se směry působení těchto sil nemění.

Cívka elektromagnetu s vlivem permanentního magnetu **SmCo** vykazuje největší působení sil, pro vzduchovou mezeru $\delta = 0,5$ mm, $F = 2306$ N v jednom směru a ve druhém $F = -2238$ N (viz Obr. 27, první řádek vpravo). Při zvyšování vzduchové mezery síla rychle slábne až do výšky vzduchové mezery $\delta = 4$ mm, kde je síla rovna $F = 1821$ N v jednom směru, ve druhém $F = -1814$ N a velikosti sil zůstávají při dalším zvyšování vzduchové mezery víceméně konstantní (viz Příloha č. 20 – č. 22). Pro vzduchové mezery $\delta > 10$ mm pak opět pokračuje slábnutí těchto sil.

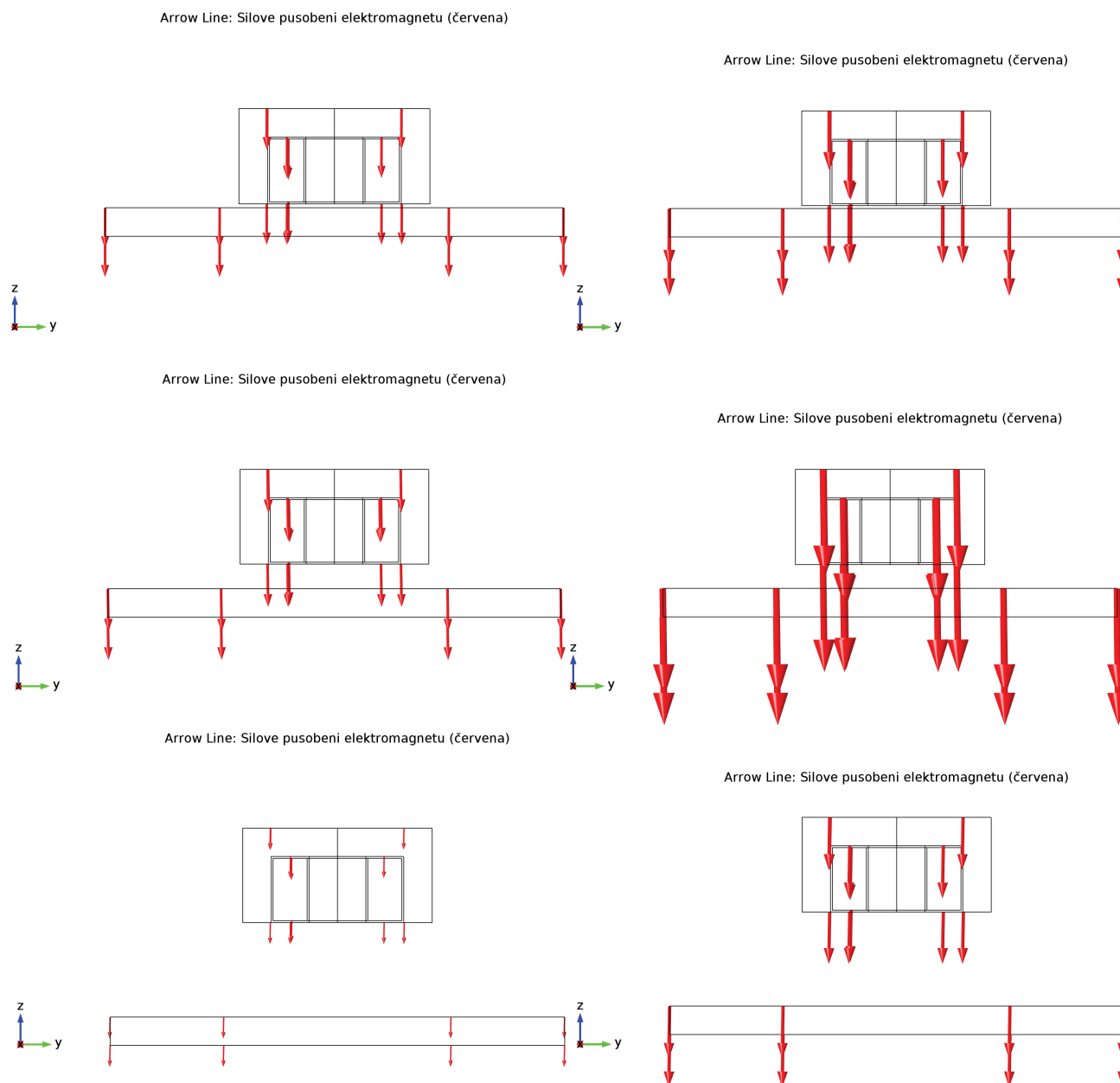
S vlivem permanentního magnetu **NdFeB** vykazují síly s postupně rostoucí výškou vzduchové mezery (od $\delta = 0,5$ mm) největší působení síly $F = 840$ N v jednom směru a ve druhém $F = -820$ N při $\delta = 1$ mm (viz Příloha č. 17). Tyto síly, oproti předchozímu působení sil vlivem **SmCo**, do výšky vzduchové mezery $\delta = 3,5$ mm kolísavě slábnou, avšak po jejím dosažení nabývají stále (víceméně konstantní) hodnoty síly $F \approx \pm 700$ N až po dobu zvyšování výšky vzduchové mezery na $\delta = 10$ mm (viz Příloha č. 17 – č. 19). Od vzduchové mezery $\delta > 10$ mm též opět pokračuje slábnutí těchto sil. Největší síla pro vzduchovou mezeru $\delta = 1$ mm je pravděpodobně způsobena počátečním kolísáním síly.

Z porovnání sil při působení obou typů permanentních magnetů na cívku elektromagnetu je zjevné, že hodnoty celkových působících sil jsou přibližně 3-krát vyšší u permanentního magnetu **SmCo** v celém simulovaném rozsahu, než u permanentního magnetu **NdFeB**, kde tyto síly nabývají spíše konstantnějších velikostí. Přehled vyexportovaných obrázků Lorentzovy síly je vyobrazen v Příloze č. 17 – č. 22.

4.4. Silové působení elektromagnetu

Výpočet silového působení elektromagnetu vůči permanentnímu magnetu – silové interakce mezi nimi – byl zaměřen ryze na působící sílu elektromagnetu vzhledem k různým vzdálenostem od permanentního magnetu (velikostí vzduchové mezery δ).

Na vybraných vyexportovaných obrázcích dále jsou vyobrazeny směry silového působení ve formě červeně zbarvených šipek znázorňující působení elektromagnetu. Vyobrazené výsledky v levém sloupci jsou pro permanentní magnet **NdFeB** a výsledky v pravém sloupci pro permanentní magnet **SmCo**:



Obr. 28. Náhledy silového působení interakce elektromagnetu na permanentní magnet pro velikosti vzduchové mezery $\delta = 1 \text{ mm}$; $6,5 \text{ mm}$; 25 mm
levý sloupec: *NdFeB*, viz Příloha č. 23 – 25; pravý sloupec: *SmCo*, viz Příloha č. 26 – 28

Tato silová působení byla vypočtena programem Comsol na základě rovnice (6) uvedené v kapitole 3.2.

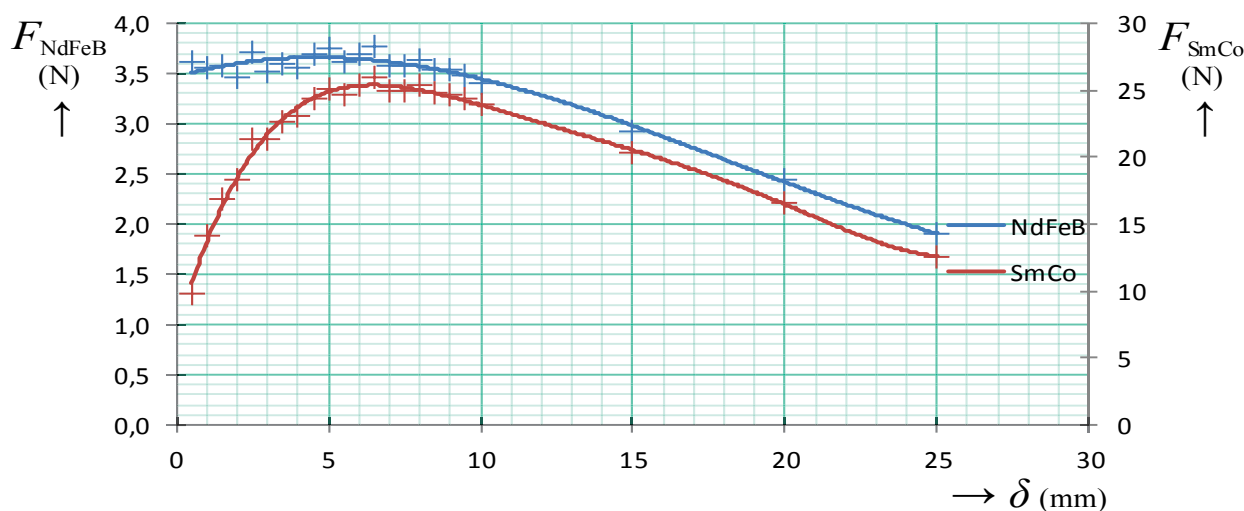
Silová působení elektromagnetu na permanentní magnet *NdFeB* jsou z počátku pro malé výšky vzduchových mezer přibližně stejná až konstantní. Pro $\delta = 0,5 \text{ mm}$ dosahuje síla hodnoty $F = 3,61 \text{ N}$ (viz Příloha č. 23) a tato hodnota, se zvyšující se výškou vzduchové mezery, nepatrně roste až do hodnoty svého maxima $F = 3,77 \text{ N}$ při výšce vzduchové mezery $\delta = 6,5 \text{ mm}$ (viz Obr. 28, druhý řádek vlevo). Od této hodnoty maxima, při zvyšující se výšce vzduchové mezery, poté dochází k poklesu tohoto silového působení. Pro vzduchové mezery $\delta > 25 \text{ mm}$ odpovídá působící síla hodnotám kolem $F < 1,9 \text{ N}$ (viz Obr. 28, třetí řádek vlevo).

Silové působení s permanentním magnetem *SmCo* je pro počáteční hodnotu vzduchové mezery $\delta = 0,5 \text{ mm}$ vzhledem k nadcházejícím hodnotám malé. Zprvu nabývá hodnoty $F = 9,8 \text{ N}$ (viz Příloha č. 26), což v porovnání s maximální hodnotou působení síly pro permanentní magnet *NdFeB* je již

přibližně dvojnásobné, avšak s dalším růstem výšky vzduchové mezery tyto síly rapidně rostou až do hodnoty svého maxima, které je rovno síle $F = 25,93$ N při výšce vzduchové mezery $\delta = 6,5$ mm (viz Obr. 28, druhý řádek vpravo). Od této hodnoty maxima poté dochází taktéž při zvyšující se velikosti vzduchové mezery k výraznějšímu poklesu tohoto silového působení. Pro výšky vzduchových mezer $\delta > 25$ mm odpovídají působící síly nižším hodnotám než $F = 12,6$ N (viz Obr. 28, třetí řádek vpravo).

Všechny vypočtené datové hodnoty silových působení elektromagnetu pro jednotlivé výšky vzduchových mezer a pro oba typy permanentních magnetů jsou pro přehlednost zanesené v následující závislosti s průběhy znázorňujícími tahovou charakteristiku elektromagnetu:

Tahová charakteristika simulovaného elektromagnetu



Obr. 29. Průběhy silových působení elektromagnetu na oba typy permanentních magnetů při změně velikosti vzduchové mezery

Průběhy závislosti jsou tvořeny datovými body, které byly proloženy pomocí spojnice trendu. Na vodorovné ose jsou uvedené jednotlivé velikosti vzduchové mezery, na svislých osách jsou vynášeny velikosti působící síly elektromagnetu v interakci s permanentním magnetem, kde jsou na levou svislou osu vynášeny hodnoty sil pro *NdFeB* a na pravou svislou osu hodnoty sil pro *SmCo*.

Z této tahové charakteristiky na Obr. 29 je zjevné, že průběh silového působení elektromagnetu pro materiál permanentního magnetu **NdFeB** nabývá své maximální hodnoty ve výšce $\delta = 4,5$ mm. Ačkoliv nejvyšší vypočtená hodnota síly náleží pro výšku $\delta = 6,5$ mm, tak dle proložení ostatních vypočtených hodnot jde o nepatrnou výpočtovou odchylku způsobenou výpočtovým řešičem v programu Comsol. Čelní průběh této závislosti nabývá víceméně konstantního, mírně rostoucího průběhu. Hodnoty sil se tedy pohybují kolem $F \approx 3,66$ N.

Průběh silového působení elektromagnetu pro materiál permanentního magnetu **SmCo** nabývá maximální hodnoty pro výšku $\delta = 6,5$ mm, v hodnotě síly $F = 25,93$ N. Čelní průběh je na rozdíl od závislosti pro *NdFeB* z počátku strmější a nabývající mnohem vyšších hodnot silového působení.

Oba týlní průběhy pro permanentní magnety pak dále (od svých vrcholových hodnot) nabývají totožného klesajícího charakteru.

Jak je vidět na Obr. 29, celkové hodnoty působících sil jsou mezi *NdFeB* a *SmCo* značně rozdílné – interakce elektromagnetu s permanentním magnetem *SmCo* vyvíjí přibližně 7-krát více síly oproti interakci s permanentním magnetem *NdFeB*.

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nalezení neoptimálnější vzdálenosti stejnosměrného elektromagnetu od příslušného permanentního magnetu s ohledem na silovou interakci mezi nimi. K vytvoření geometrie modelu, výpočtu a následné simulaci bylo využíváno softwarového programu „COMSOL Multiphysics v4.4“. V něm byl proveden trojrozměrný návrh vlastního modelu elektromagnetu a návrh rovinné desky reprezentující permanentní magnet, pro které byly přiřazeny dané materiálové vlastnosti a okrajové podmínky, z nichž poté byla prováděna simulace pro různé výšky vzduchové mezery a výpočet nejen samotné interakční síly, ale i působení souvisejících veličin jako magnetická indukce, magnetická intenzita a Lorentzova síla.

Jako materiály permanentního magnetu byly vybrány dva materiálové typy magnetů ze vzácných zemin – *NdFeB* a *SmCo*, které v porovnání s jinými druhy magnetů nejvíce vynikají ve svých vlastnostech, zejména silových. Simulace silové interakce a výpočty magnetických indukcí, magnetických intenzit a Lorentzových sil byly simulovány pro oba tyto permanentní magnety. Při postupném navyšování výšky vzduchové mezery mezi elektromagnetem a permanentním magnetem, od malých hodnot po vyšší, docházelo skrze všechny výpočtové veličiny k nejčastějším anomálním změnám v rozsahu $\delta = 4 - 6,5$ mm.

U magnetické indukce docházelo v tomto rozmezí k lokálním nárůstům v plášti elektromagnetu pro *NdFeB* při $\delta = 5$ mm a na okrajích permanentního magnetu pro oba materiály při $\delta = 6,5$ mm. U magnetické intenzity, v objemu permanentního magnetu, docházelo souběžně k jejímu zeslabování i místy k zesilování pro *NdFeB* ve výšce $\delta = 4,5$ mm, pro *SmCo* ve výškách $\delta = 4 - 6$ mm a při spodním povrchu elektromagnetu nabývala pro oba materiály při $\delta = 4 - 10$ mm konstantních hodnot. A Lorentzovy síly nabývaly v rozmezí $\delta = 3,5 - 10$ mm pro oba materiály mírně kolísavých konstantních hodnot.

Na základě výsledných výpočtů silového působení elektromagnetu z kapitoly 4.4 považuji za neoptimálnější vzdálenost pro silovou interakci elektromagnetu od permanentního magnetu výšku vzduchové mezery $\delta = 4,5$ mm pro typ permanentního magnetu *NdFeB* a výšku $\delta = 6,5$ mm pro typ permanentního magnetu *SmCo*. Ačkoliv oba typy simulovaných permanentních magnetů pochází ze stejné skupiny magnetických materiálů ze vzácných zemin, kde *NdFeB* je doposud označován za nejsilnější permanentní magnet, simulace popisována v této práci prokazuje vhodnější použití permanentního magnetu *SmCo*, který vykazuje celkově až 7-krát vyšších hodnot tohoto silového působení interakce oproti *NdFeB*. Konkrétněji pro neoptimálnější vzdálenost vzduchové mezery je silová interakce rovna síle $F = 25,93$ N, která s přihlédnutím na rozměry a velikost daného elektromagnetu postačuje pro funkci magnetické levitace.

Je však nutné podotknout, že v simulaci byla pro daný elektromagnet brána v úvahu pouze jedna konstantní hodnota napájecího proudu. V praxi tato hodnota proudu konstantní není, je naopak velmi dynamická, kde cívka elektromagnetu disponuje daleko vyššími hodnotami (u větších elektromagnetů řádově i desítky kA). Se změnou tohoto proudu dochází společně k celkovým změnám magnetické indukce, magnetické intenzity a silových působení v elektromagnetu.

Dále byl v práci brán v úvahu permanentní magnet v podobě rovinné plochy, která se při zvolených magnetických materiálech o takových velikostech reálně nevyrábí. Permanentní magnety ze vzácných zemin jsou vyráběny přibližně o rozměrech 28×12 mm a rovinná plocha by tedy mohla vzniknout způsobem společného uskupení těchto segmentů permanentních magnetů v jeden celek o rozměrech patřičné roviny. Při zkušební simulaci interakce s takto složenou rovinou permanentních magnetů dosahovaly veškeré výpočty s nepatrnými odchylkami shodných výsledků jako při použití jedné velké rovinné plochy.

Při případné realizaci této simulace v laboratorních podmínkách by elektromagnet stěží dosahoval smysluplné levitace nad segmenty permanentních magnetů, jelikož by nebyla zajištěna jeho patřičná stabilizace. Ta se v praxi řeší zpětnovazebními regulátory regulující tok proudu proudící cívkou elektromagnetu na základě převodníků neelektrických veličin a snímačů například na optickém principu. [5]

Literatura

- [1] BUL, B. K. – a kolektiv. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1977. L25-B3-V-31f/52220.
- [2] MAYER, D. – ULRYCH, B. *Elektromagnetické aktuátory*. 1.vyd. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [3] HAVELKA, O. – a kolektiv. *Elektrické přístroje*. 1.vyd. Praha: SNTL; Bratislava: Alfa, 1985. L25-C3-IV-3U/58603
- [4] DRÁPALA, J. – KURSA, M. *Elektrotechnické materiály*. 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0
- [5] MAYER, D. *Elektrodynamika v energetice*. 1.vyd. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-164-0
- [6] ZAJACZEK, S. *Návrh magnetického upínadla s trvalými magnety*. Ostrava, 2003. Diplomová práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava. Vedoucí diplomové práce David Helštýn.
- [7] *Silnoproudá elektrotechnika* [online]. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/se/SEL1a.pdf>.
- [8] *Permanentní magnety - co je třeba vědět o magnetech* [online]. Sinomag s.r.o., výrobce permanentních magnetů a magnetických materiálů. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf>.
- [9] *SELOS Bohemia* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magnety.eu>>.
- [10] *MAGSY s.r.o.* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magsy.cz>>.
- [11] *HUMUSOFT s.r.o., výhradní zástupce švédské firmy COMSOL AB pro ČR* [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <<http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>>.
- [12] *Materiály k výuce: Numerické metody* [online]. MU Brno, 2013. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.math.muni.cz/~xrajdl/NMI_cv11.pdf>.
- [13] CONSTANTINIDES, S. *Magnet FAQs* [online]. Arnold Magnetic Technologies Corporation, globální výrobce vysoce výkonných magnetů, poslední revize 7.2.2013 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.magneticmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2013/01/Arnold_Constantinides.pdf>.
- [14] *Ningbo YiLi Magnetic Co., Ltd.* [online]. Výrobce a dodavatel magnetických materiálů, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magnetmaterialyl.com>>.
- [15] *Hangzhou YangYi Magnetics Co., Ltd.* [online]. Dodavatel permanentních magnetů, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.smi-mag.com>>.
- [16] *Maanshan CY magnetic technology Co., Ltd.* [online]. Výzkum, vývoj, výroba a obchod s magnety, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.cymagnet.com>>.
- [17] *Wikimedia Commons* [online]. Organizované úložiště licenčně volného multimediálního obsahu. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <<http://commons.wikimedia.org>>.

Seznam příloh

Příloha č. 1	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 2	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 3	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 4	Velikosti působení magnetické indukce mezi okrajem pláště a cívky elektromagnetu s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 2; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 5	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 6	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 7	Velikosti působení magnetických indukcí s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 8	Velikosti působení magnetické indukce mezi okrajem pláště a cívky elektromagnetu s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 2; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 9	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 10	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 11	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 12	Velikosti působení magnetické intenzity mezi okrajem pláště a cívky elektromagnetu s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 2; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 13	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 14	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 15	Velikosti působení magnetických intenzit s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 16	Velikosti působení magnetické intenzity mezi okrajem pláště a cívky elektromagnetu s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 2; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25$ mm.

Příloha č. 17	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 18	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 19	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 20	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 21	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 22	Působení Lorentzovy síly v cívce elektromagnetu s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 23	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 24	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 25	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem NdFeB pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.
Příloha č. 26	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ mm.
Příloha č. 27	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9$ mm.
Příloha č. 28	Silové působení interakční síly s permanentním magnetem SmCo pro výšky $\delta = 9,5; 10; 15; 20; 25$ mm.